

Bachelorarbeit

Tom Philipp

**Vergleich von geschweißten
Kranbahnträgern für Einfeldträger
mit schwerem Kranbetrieb,
unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit**

Mittweida, 2015

Bachelorarbeit

**Vergleich von geschweißten
Kranbahnträgern für Einfeldträger
mit schwerem Kranbetrieb,
unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit**

Autor:

Herr

Tom Philipp

Studiengang:

Stahl- und Metallbau

Seminargruppe:

SM11w1-B

Erstprüfer:

Herr Prof. Dr. -Ing. Torsten Laufs

Zweitprüfer:

Dipl. -Ing. Jürgen Schädlich

Einreichung:

24.11.2015

Verteidigung/Bewertung

Mittweida, 2015

Bibliografische Beschreibung:

Philipp, Tom

Vergleich von geschweißten Kranbahnträgern für Einfeldträger mit schwerem Kranbetrieb, unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit. -2015. –V, 30, LXIX S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau,
Bachelorarbeit, 2015

Referat:

In der vorliegenden Bachelorarbeit werden geschweißte Kranbahnträger unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit gegenübergestellt. Der erste Teil stellt die theoretischen Grundlagen der Bemessung von Kranbahnträger nach Eurocode dar.

Im praktischen Teil wurde ein Berechnungslogarithmus mithilfe des Excel-Programms erstellt, mit dem die sechs Parameter Obergurtbreite und –dicke, Untergurtbreite und –dicke, Trägerhöhe und Stegdicke so eingestellt werden können, dass die Querschnittsfläche klein wird und gleichzeitig die Tragfähigkeitsnachweise, Ermüdungsnachweise und die Gebrauchstauglichkeitsnachweise erfüllt werden.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Zielstellung	1
1.3 Abgrenzung	1
2 Theoretische Grundlagen.....	2
2.1 Bauarten von Kranen	2
2.2 Querschnitte von Kranbahnträgern	3
2.3 Kranschienen.....	3
2.4 Kranfahrwerksysteme	4
3. Berechnungsgrundlagen	4
3.1 Belastungen der Kranbahnen (DIN EN 1991-3).....	4
3.1.1 Dynamische Faktoren für den Kranbetrieb.....	4
3.1.2 Vertikale, veränderliche Lasten aus Kranbetrieb.....	5
3.1.3 Horizontale, veränderliche Lasten aus Kranbetrieb.....	6
3.1.4 Weitere veränderliche Einwirkungen	6
3.1.5 Außergewöhnliche Einwirkungen	7
3.2 Lastgruppenbildung (DIN EN 1991-3, Tab.2.2).....	7
3.3 Einwirkungskombination (EK)	8
3.3.1 EK Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	8
3.3.2 EK Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	8
3.3.3 EK Grenzzustand der Ermüdung	9
4 Schnittgrößenermittlung.....	9
4.1 Culmannsche Laststellung: Hauptbiegung M_y	9
4.2 Lokale Biegung $M_{z,\text{lokal}}$	10
4.3 Gurtnormalkraft N_H, OG	10
5 Nachweisführung	11
5.1 Tragfähigkeitsnachweise.....	11
5.1.1 Grundwerkstoff.....	12

5.1.2 Schweißnähte.....	14
5.2 Stabilitätsnachweise	15
5.2.1 Biegedrillknicken – Knicken des Obergurtes.....	15
5.2.2 Beulnachweise	16
5.3 Ermüdungsnachweise	17
5.3.1 Grundlagen.....	17
5.3.2 Typische Nachweisstellen und Kerbfälle.....	19
5.4 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	20
6. Grundlagen der Excel-Programmierung	22
6.1 Grundprinzip	22
6.2 Werkzeuge der Excel-Programmierung	23
7. Vergleich geschweißter Kranbahnträger	24
7.1 Optimierung von Kranbahnträgerquerschnitten	24
7.2 Dimensionierung des Obergurtes	28
7.3 Dimensionierung des Untergurtes	28
7.4 Dimensionierung des Steges	29
8. Auswertung	30
9. Literatur.....	VI
10. Anlagen	VII
11. Selbstständigkeitserklärung	LXIX

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einträger-Brückenkran.....	2
Abb. 2: Zweiträger-Brückenkran	2
Abb. 3: Querschnittstypen für Kranbahnträger	3
Abb. 4: Kranschiene der Form A (links) und Kranschiene der Form F (rechts)	3
Abb. 5: Torsion des Obergurtes	6
Abb. 6: Belastung einer Kranbahn	9
Abb. 7: Culmannsche Laststellung	10
Abb. 8: Gurtnormalkraft.....	11
Abb. 9: Nachweisstellen.....	11
Abb. 10: Tragwirkungssplitting	12
Abb. 11: Biegedrillknicken – Knicken des Obergurtes	16
Abb. 12: Maßgebende Spannungen in Kehlnähten nach [3-1-9/5]	19
Abb. 13: Beispiele typischer Kerbfälle für Kranbahnträger aus Dreiblechquerschnitten	19
Abb. 14: Eingaben, Zusammenfassung, Auszug aus der kompletten Nachweisführung	22
Abb. 15: Screenshot der Excel-Tabelle.....	23
Abb. 16: Screenshot der Blattregisterkarten	23
Abb. 17: Screenshot des Solvers	26
Abb. 18: Vergleich der beiden Querschnitte.....	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schwingbeiwerte nach [1-3/Tab.2.1, 2.4, 2.6 und 2.10]	4
Tabelle 2: Fortsetzung.....	5
Tabelle 3: Hubklassen und Beanspruchungsklassen nach [1-3/Tab..B.1].....	5
Tabelle 4: Lastgruppenbildung (DIN EN 1991-3, Tab.2.2)	7
Tabelle 5: Teilsicherheitsbeiwerte	8
Tabelle 6: Kombinationsbeiwerte	8
Tabelle 7: Effektive Lastausbreitungslänge.....	13
Tabelle 8: Erforderliche Anzahl von Inspektionsintervallen nach [3-6NA/Tab.NA.3]	17
Tabelle 9: Schadensäquivalente Beiwerte nach [1-3/Tab.2.12]	18
Tabelle 10: Kerbfälle nach [3-1-9]	19
Tabelle 11: Grenzwerte für vertikale Verformungen nach [3-6/Tab.7.2]	20
Tabelle 12: Grenzwerte für horizontale Verformungen nach [3-6/Tab.7.1].....	21
Tabelle 13: Fortsetzung.....	21
Tabelle 14: Nachweiszusammenfassung HEA 400	25
Tabelle 15: Nachweiszusammenfassung HEA 360	25
Tabelle 16: Optimierungsvariablen.....	27
Tabelle 17: Nachweiszusammenfassung des optimierten Dreiblechquerschnitts	27
Tabelle 18: Nachweiszusammenfassung der Variante 4	29
Tabelle 19: Nachweiszusammenfassung der Variante 5	29

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BDK	Biegedrillknicken
BK	Beanspruchungsklasse
EK	Einwirkungskombination
EN	Europäische Norm
GZE	Grenzzustand der Ermüdung
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
NA	Nationaler Anhang
Tab.	Tabelle

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Um wettbewerbsfähig zu bleiben, in Zeiten der Automation und Massenproduktion, ist die Krantechnik heute nicht mehr wegzudenken.

Krane sind Maschinen, die zum Transport von Gütern auf meist festgelegtem Weg benutzt werden. Dabei sind die Kranbahnträger die Fahrwege von Kranen.

Der Kran als Fördermaschine kann in zwei Gebiete unterteilt werden. Zum einen wird der Kran an sich in den Maschinenbau und in die Elektrotechnik eingestuft, wobei die Tragwerke und Kranbahnen im Teilgebiet des Stahlbaus einzuordnen sind. Die Oberkante der Schiene eines Kranbahnträgers stellt die Trennungslinie zwischen Stahlbau und Maschinenbau dar. In der vorliegenden Arbeit wird speziell der Kranbahnträger behandelt. Die auftretenden Lasten auf die Krantragwerke sind nicht vorwiegend ruhende Lasten, was Konsequenzen für Konstruktion, Bemessung und Nachweise der Tragwerke hat. Besonders die Ermüdungsprobleme und die Stabilitätsprobleme spielen eine wichtige Rolle. Aufgrund steigender Anforderung moderner Produktionsstätten wird auch auf die Gebrauchstauglichkeit hoher Wert gelegt.

1.2 Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit sind Vergleiche zwischen geschweißten Kranbahnträgern für „schweren Kranbetrieb“, unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit.

Dabei wurde eine Literaturanalyse zur Kranbahnbemessung mit Schlingerverband aufgestellt. Anhand dieser Analyse konnte dann ein Berechnungslogarithmus für alle erforderlichen Nachweise wie Tragfähigkeitsnachweise, Stabilitätsnachweise, Betriebsfestigkeitsnachweise und Verformungsnachweise erstellt werden. Mit diesem Berechnungslogarithmus können schnell und effektiv die erforderlichen Nachweise geführt und ausgewertet werden. Besondere Aufmerksamkeit gilt den sechs frei wählbaren Parametern: Obergurtbreite und –dicke, Untergurtbreite und –dicke, Trägerhöhe und Stegdicke, mit denen der Querschnitt so klein wie möglich gehalten werden kann.

1.3 Abgrenzung

Wie schon in der Zielstellung erwähnt, werden Kranbahnträger aus geschweißten Dreiblechquerschnitten mit Schlingerverband behandelt. Weitere Abgrenzungen können aus den Programmeinschränkungen entnommen werden:

- Es sind nur zwei Laufräder pro Kopfträger vorgesehen.
- Nachweise können nur für Querschnittsklasse 1 und 2 geführt werden.
- Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für die horizontale Durchbiegung wird nicht geführt.
- Die sehr seltene Beanspruchungsklasse S9 wird nicht berücksichtigt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Bauarten von Kranen

Krananlagen werden nach ihrer Bauart unterteilt. Im Folgenden werden einige Krananlagen aufgezählt:

- Brückenkrane
- Hängekatzen
- Schwenkkrane
- Konsolkrane
- Portalkrane

Es soll kurz auf die Brückenlaufkrane eingegangen werden.

Brückenlaufkrane werden in zwei Bauarten unterteilt: der Einträger-Brückenkran und der Zweiträger-Brückenkran. Bei dem Einträger-Brückenkran ist die Regelausführung die Unterflansch-Katze (Abb. 1). Diese Bauart wird hauptsächlich bei geringen Lasten eingesetzt (ca. 10 t).

Die zweite Variante zeichnet sich durch eine auf Schienen gesetzte Laufkatze aus. Hublasten von über 100 t sind keine Seltenheiten (Abb. 2).

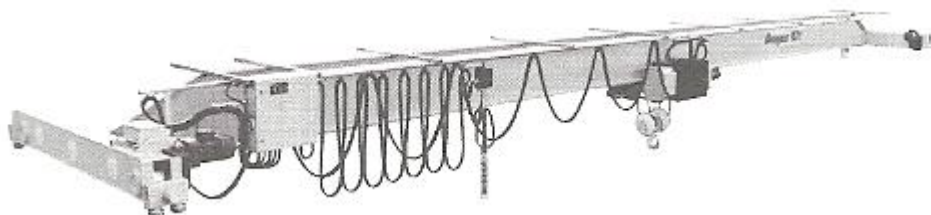


Abb. 1: Einträger-Brückenkran

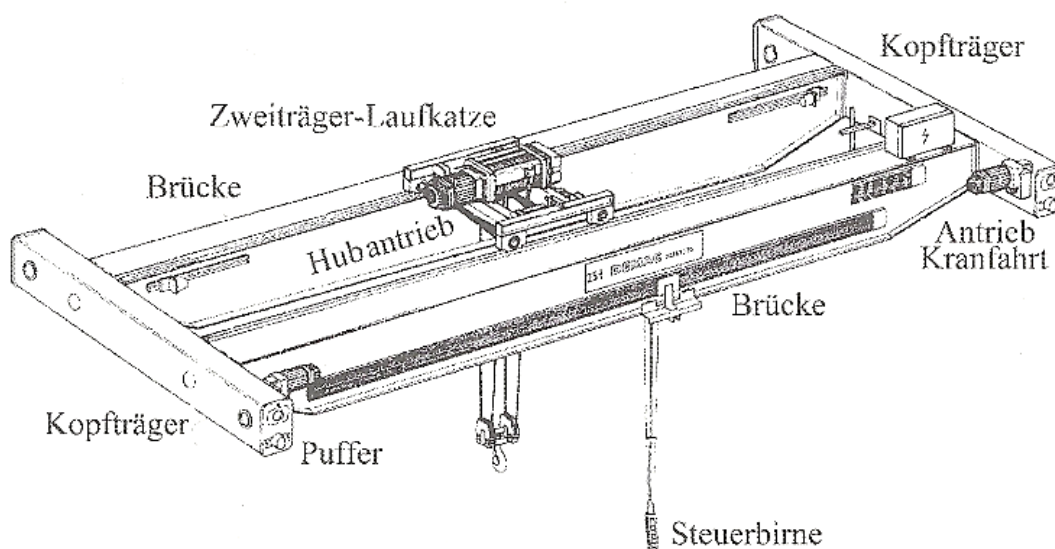


Abb. 2: Zweiträger-Brückenkran

2.2 Querschnitte von Kranbahnträgern

Abhängig von den Radlasten, Beanspruchungsklasse und der Spannweite werden unterschiedliche Querschnittstypen gewählt (Abb. 3).

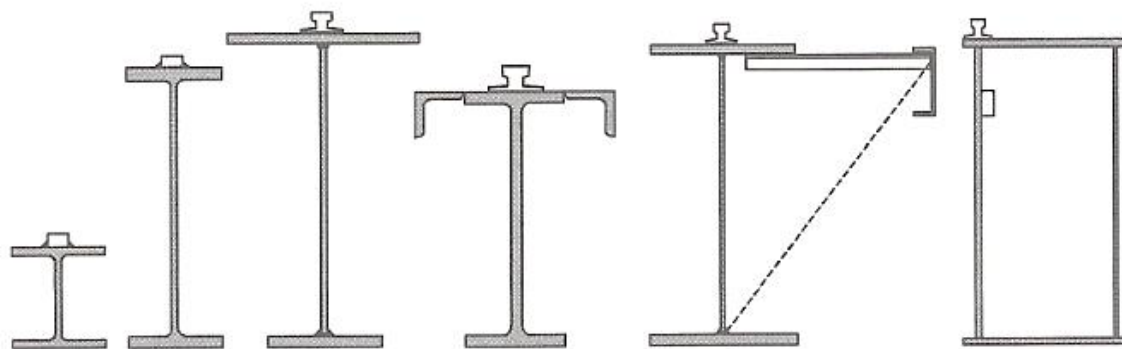


Abb. 3: Querschnittstypen für Kranbahnträger

Besonders die I-Schweißprofile, mit ihren sechs frei wählbaren Parametern (Obergurtbreite und -dicke, Untergurtbreite und -dicke, Trägerhöhe und Stegdicke) können gut an die Beanspruchungen angepasst werden.

Bei hohen Horizontalbelastungen oder Spannweiten kann ein Horizontalverband (Schlingerverband) eingebaut werden, um die ausreichende Quersteifigkeit zu erreichen. Der Horizontalträger wird als fachwerkartiger Verband und in Höhe der Obergurtebene ausgeführt.

2.3 Kranschienen

a) Flachstahlschiene

Flachstahlschienen in den üblichen Maßen Breite x Höhe: 50 x 30 ; 60 x 40 ; 60 x 50 ; 70 x 50, werden durch eine Doppelkehlnaht an den Kranbahnträger geschweißt. Die Naht kann durchgehend oder unterbrochen ausgeführt werden. Wobei die durchgehende Naht der unterbrochenen Naht in Hinsicht auf Ermüdung und Korrosion vorzuziehen ist.

b) A/F-Kranschiene

A/F-Kranschienen werden über Klemmplatten mit dem Kranbahnträger verbunden. Die Klemmplatten können verhältnismäßig schnell ausgewechselt werden und es besteht die Möglichkeit elastische Unterlagen zu verwenden.



Abb. 4: Kranschiene der Form A (links) und Kranschiene der Form F (rechts)

2.4 Kranfahrwerksysteme

Es gibt zwei Achstypen: Typ „I“ – Einzelradantrieb und Typ „C“ – Zentralradantrieb. Wie schon zu vermuten, wird beim Typ „I“ jedes der beiden Räder angetrieben. Beim Typ „C“ werden die Räder zentral und drehzahlgekoppelt über einen Motor angetrieben. Des Weiteren wird noch bei der horizontalen Radlagerung unterschieden. Dabei steht „F“ für Festlager und „M“ für Loslager. Achstyp und Typ der Radlagerung werden zu vier Möglichkeiten zusammengefasst:

- IFF: Einzelradantrieb mit beiden Rädern als Festlager
- IFM: Einzelradantrieb, ein Rad Festlager, ein Rad Loslager
- CFF: Zentralradantrieb mit beiden Rädern als Festlager
- CFM: Zentralradantrieb, ein Rad Festlager, ein Rad Loslager

3. Berechnungsgrundlagen

3.1 Belastungen der Kranbahnen (DIN EN 1991-3)

3.1.1 Dynamische Faktoren für den Kranbetrieb

Krananlagen unterliegen beim Heben und Senken der Hublast ständig dynamischen Belastungen in Form von Stößen. Um die dadurch anfallenden dynamischen Berechnungen zu umgehen, werden, abhängig von den Hubklassen, Schwingbeiwerte eingeführt und somit quasi-statisch berücksichtigt. (Tab. 1)

φ_i	Berücksichtigter Einfluss	Anzuwenden auf	Definition der Schwingbeiwerte															
φ_1	Schwingungsanregung des Krantragwerks infolge Anheben der Hublast	Eigengewicht des Krans	$0,9 < \varphi_1 < 1,1$ 1,1 und 0,9 decken die unteren und oberen Werte des Schwingungsimpulses ab.															
φ_2	Dynamische Wirkungen beim Anheben der Hublast vom Boden	Hublast	$\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h$; v_h konstante Hubgeschwindigkeit in [m/s]; $\varphi_{2,\min}$ und β_2 sind von der Hubklasse des Krans abhängig. <table><tr><th>Hubklasse</th><th>β_2</th><th>$\varphi_{2,\min}$</th></tr><tr><td>HC 1</td><td>0,17</td><td>1,05</td></tr><tr><td>HC 2</td><td>0,34</td><td>1,10</td></tr><tr><td>HC 3</td><td>0,51</td><td>1,15</td></tr><tr><td>HC 4</td><td>0,68</td><td>1,20</td></tr></table>	Hubklasse	β_2	$\varphi_{2,\min}$	HC 1	0,17	1,05	HC 2	0,34	1,10	HC 3	0,51	1,15	HC 4	0,68	1,20
Hubklasse	β_2	$\varphi_{2,\min}$																
HC 1	0,17	1,05																
HC 2	0,34	1,10																
HC 3	0,51	1,15																
HC 4	0,68	1,20																
φ_3	Dynamische Wirkungen durch plötzliches Loslassen der Nutzlast bei Verwendung von Greifern und Magneten	Hublast	$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m} \cdot (1 + \beta_3)$ Δm der abgesetzte oder losgelassene Teil der gesamten Hublastmasse m $\beta_3 = 0,5$ bei Kranen mit Greifern oder ähnlichen Vorrichtungen für langsames Absetzen $\beta_3 = 1,0$ bei Kranen mit Magneten oder ähnlichen Vorrichtungen für schnelles Absetzen															
φ_4	Dynamische Wirkungen, hervorgerufen durch Fahren auf Schienen o.Ä.	Eigengewicht von Kran und Hublast	$\varphi_4 = 1,0$, falls die in EN 1090-2 für Kran-schienen festgelegten ergänzenden Toleranzen der Klasse 1 eingehalten werden. Sonst: siehe EN 13001-2															

Tabelle 1: Schwingbeiwerte nach [1-3/Tab.2.1, 2.4, 2.6 und 2.10]

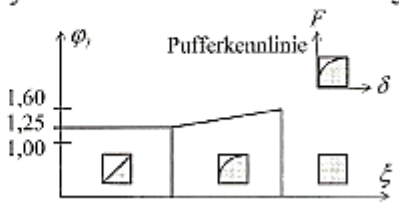
φ_5	Dynamische Wirkungen verursacht durch Antriebskräfte	Antriebskräfte	$\varphi_5 = 1,0$ für Fliehkräfte $1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$ für Systeme mit stetiger Veränderung der Kräfte $1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$ wenn plötzliche Veränderungen der Kräfte auftreten $\varphi_5 = 3,0$ bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel
φ_6	Dynamische Wirkungen infolge einer Prüflast	Dyn. Prüflast 110 %	$\varphi_6 = 0,5 (1 + \varphi_2)$ [1-3/2.10 (4)]
φ_7	Dynamische, elastische Wirkungen verursacht durch Pufferanprall	Pufferkräfte	$\varphi_7 = 1,25$ für $0 \leq \xi \leq 0,5$ $\varphi_7 = 1,25 + 0,7 \cdot (\xi - 0,5)$ für $0,5 \leq \xi \leq 1$ ξ ist von der Pufferkennlinie abhängig 

Tabelle 2: Fortsetzung

Nach DIN EN 1991-3:2006, Anhang B werden Krane, aus praktischen Erfahrungen, entsprechend ihrem Verwendungszweck, dem Einfluss des Hubvorgangs und der Art des Lastaufnahmemittel in Hubklassen (HC 1 bis HC 4) und Beanspruchungsklassen (S 0 bis S 9) eingeteilt. (Tab. 3)

	Hubklasse	S-Klasse
Montagekrane	HC1, HC2	S0, S1
Maschinenkrane	HC1	S0, S1
Lagerkrane, unterbrochener Betrieb	HC2	S4
Lager-, Traversen-, Schrottplatzkrane, im Dauerbetrieb	HC3, HC4	S6, S7
Werkstattkrane	HC2, HC3	S3, S4
Brückenkrane, Anschlagkrane, im Greifer- oder Magnetbetrieb	HC3, HC4	S6, S7
Gießereikrane	HC2, HC3	S6, S7
Tiefofenkrane	HC3, HC4	S7, S8
Stripperkrane, Beschickungskrane	HC4	S8, S9
Schmiedekrane	HC4	S6, S7
Transportbrücken, Halbportalkrane, Portalkrane, mit Katz- oder Drehkran; im Hakenbetrieb	HC2	S4, S5
...wie vorige Zeile, jedoch im Greifer- oder Magnetbetrieb	HC3, HC4	S6, S7

Tabelle 3: Hubklassen und Beanspruchungsklassen nach [1-3/Tab..B.1]

3.1.2 Vertikale, veränderliche Lasten aus Kranbetrieb

Die charakteristischen vertikalen Radlasten ergeben sich aus der Hublast und dem Eigengewicht der Kranbrücke, multipliziert mit den jeweiligen Schwingbeiwerten.

$$F_1 = \varphi_1 \cdot Q_{c,1} + \varphi_i \cdot Q_{h,1}$$

Grundsätzlich wird nach [1-3, 2.5.2.1 (2)] eine Radexzentrizität festgelegt. Diese Bestimmung wird in den Regelungen zum Bauteilwiderstand wieder eingeschränkt: Eine Radlastexzentrizität von $\frac{1}{4}$ der Schienenkopfbreite b_r sollte nur für den Ermüdungsnachweis in den Beanspruchungsklassen S3 bis S9 berücksichtigt werden. [3-NA/9.3.3(1)]

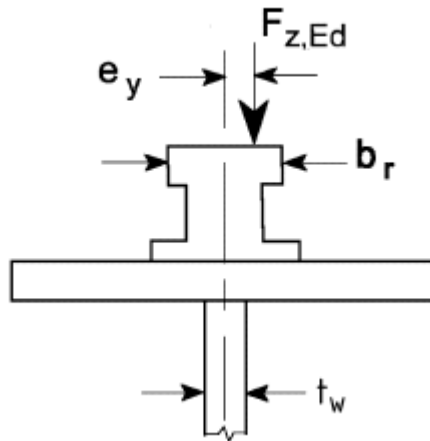


Abb. 5: Torsion des Obergurtes

3.1.3 Horizontale, veränderliche Lasten aus Kranbetrieb

Es wird unterschieden zwischen Horizontallasten H_L , H_T beim Anfahren (Resultierende der Antriebs- oder Bremskräfte liegt außermittig zum Massenschwerpunkt), Massenkkräfte aus dem Katzfahren und Seitenlasten H_s und S aus dem Schräglauf des Brückenkranes.

- Horizontallasten aus Beschleunigen/Bremsen der Kranbrücke
- Horizontallasten aus Beschleunigen/Bremsen der Laufkatze
- Spurführungskräfte, die sich aus dem Schräglauf des Krans ergeben

Die horizontalen, veränderlichen Lasten werden meistens vom Kranhersteller bereitgestellt.

Falls notwendig, können die Spurführungskräfte nach [1-3, 2.7.4] und die Horizontallasten aus Beschleunigen/Bremsen der Kranbrücke nach [1-3, 2.7.2 (2)] auf der sicheren Seite liegend, berechnet werden. Horizontallasten aus Beschleunigen/Bremsen der Laufkatze kann durch einen Betrag von 10% der Summe aus Hublast und Eigengewicht der Katze sichergestellt werden. Meistens ist die Lastgruppe nicht maßgebend für die weiteren Berechnungen.

3.1.4 Weitere veränderliche Einwirkungen

Weitere Lasten wie Windlasten [1-3/A.1(6) und (7)], Temperaturlasten [1-3/2.8] und Lasten auf Laufstege, Treppen, Podeste und Geländer [1-3/2.9], können gegebenenfalls berechnet werden.

Falls Prüfversuche durchgeführt werden, sind die Prüflasten [1-3/2.10] nachzuweisen.

3.1.5 Außergewöhnliche Einwirkungen

Für die Pufferbemessung sind die Pufferkräfte infolge Anprall zu berücksichtigen. Diese Einwirkungen sind für den Kranbahnträger meist nicht dimensionierend. Für die Bremsverbände können die Pufferkräfte allerdings maßgebend werden. [1-3/2.11.1]

Erdbebenlasten müssen je nach geografischer Lage nach DIN EN 1998-1 berücksichtigt werden.

3.2 Lastgruppenbildung (DIN EN 1991-3, Tab.2.2)

Die aufgeführten Belastungen aus Abschnitt 3.1 mit den zugehörigen Schwingbeiwerten können zu Lastgruppen zusammengefasst werden.

Belastung	Bez. nach EC 1-3		Lastgruppen für Einwirkungskombinationen im GZT, im GZG und im Grenzzustand der Ermüdung samt Schwingbeiwerten														
	Symbol	Abschnitt	Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)							GZT, Prüflast GZT, außer- gewöhnl. 8 e)	GZT, außer- gewöhnl. 9 10		Grenzzu- stand der Ge- brauchs- taugl. d) 11 b) 12 c) 13 c)			Ermü- dung 14	
			1	2	3	4	5	6	7		11 b)	12 c)	13 c)				
Eigengewicht des Krans	Q_C	2.6	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1	1	1	1	$\varphi_{fat,1}$	
Hublast	Q_h	2.6	φ_2	φ_3	—	φ_4	φ_4	φ_4	$\eta^{a)}$	—	1	1	1	1	1	$\varphi_{fat,2}$	
Anfahren/ Bremsen der Kranbrücke	H_L H_T	2.7	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	—	—	—	φ_5	—	—	—	—	1	—	
Schräglauflauf der Kranbrücke	H_S	2.7	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1	—	—	
Anfahren/ Bremsen der Laufkatze oder des Hubwerks	$H_{T,3}$	2.7	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	
Wind in Betrieb	F_W^*	Anh. A.1	1	1	1	1	1	—	—	1	—	—	—	1	1	—	
Kranprüflast	Q_T	2.10	—	—	—	—	—	—	—	φ_6	—	—	—	—	—	—	
Pufferkraft	H_B	2.11	—	—	—	—	—	—	—	—	φ_7	—	—	—	—	—	
Kippkraft	H_{TA}	2.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	

Tabelle 4: Lastgruppenbildung (DIN EN 1991-3, Tab.2.2)

3.3 Einwirkungskombination (EK)

3.3.1 EK Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die zusammengefassten Lastgruppen aus Abschnitt 3.2 gelten nach dem EC 0 als eine einzige veränderliche Last. Die Einwirkungskombinationen für ständige und vorübergehende Bemessungssituation werden somit aus dem Eigengewicht der Kranbahn, je einer Lastgruppe (Lastgruppe 1 bis 8) nach Tab. 4 und weiteren Lasten, z.B. Windlast, gebildet. Bei Brückenkränen in einer Halle werden die Lastgruppen 1 und 5 maßgebend. Beispiel:

$1,35 \cdot \text{Eigengewicht Kranbahnträger} + 1,35 \cdot (\text{LG 1} - 8) + 1,5 \cdot \varphi_0 \cdot \text{sonstige veränderliche Last}$

Für außergewöhnliche Bemessungssituationen gelten die Lastgruppen 9 und 10. Beispiel:

$1,0 \cdot \text{Eigengewicht Kranbahnträger} + 1,0 \cdot (\text{LG 9/10}) + 1,0 \cdot \text{Pufferanprall Kran} \dots$

Tab. 5 enthält die Teilsicherheitsbeiwerte nach EC1-3, EC3-6, NA für die Einwirkungsseite.

Einwirkungen	Teilsicherheitsbeiwerte	
	Ständige und vorübergehende Bemessungssituation	Außergewöhnliche Bemessungssituation
aus Kranen, EK GZT	$\gamma_Q = 1,35$ [1-3/Tab.A.1]	$\gamma_A = 1,0$ [1-3/Tab..A.1]
aus Kranprüflast, EK GZT	$\gamma_{F, \text{Test}} = 1,1$ [3-6/2.8]	$\gamma_A = 1,0$ [1-3/Tab..A.1]
aus Kranen, EK GZG	$\gamma_{Q, \text{ser}} = 1,0$ [1-3/Anh. A. 3.2]	-
aus Kranen, EK Ermüdung	$\gamma_{FF} = 1,0$ [3-6/9.2]	-

Tabelle 5: Teilsicherheitsbeiwerte

Falls zusätzliche veränderliche Einwirkungen vorhanden sind, müssen diese mit den Kombinationsbeiwerten nach Tab. 6 berücksichtigt werden.

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
aus Kranen	1,0	0,9	a *)
*) $a = \frac{\text{Krangewicht}}{\text{Krangewicht} + \text{Hublast}}$			

Tabelle 6: Kombinationsbeiwerte

3.3.2 EK Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die Einwirkungskombinationen werden mit den Lastgruppen 11 bis 13 nach Tab. 4 und analog nach Abschnitt 3.3.1 gebildet. Ein Beispiel kann lauten:

$1,0 \cdot \text{Eigengewicht Kranbahnträger} + 1,0 \cdot (\text{LG 11-13})$

3.3.3 EK Grenzzustand der Ermüdung

Im Grenzzustand der Ermüdung sind im Regelfall nur die vertikalen Radlasten aus der maximalen Hublast zu berücksichtigen, da horizontale Lasten nicht dauernd wirken und das Eigengewicht keinen Einfluss hat. Für den Ermüdungsnachweis sind nur die Spannungsschwingbreiten maßgebend.

Die Schwingbeiwerte $\varphi_{fat,i}$ werden nach [1-3/2.12.1(7)] wie folgt berechnet:

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2} \qquad \varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2}$$

Die Einwirkungskombinationen werden analog nach Abschnitt 3.3.1 gebildet.

4 Schnittgrößenermittlung

Die Schnittgrößenermittlung bezieht sich auf den speziellen Fall für Einfeldträger mit Horizontalverband. Es soll die Vorgehensweise im Berechnungslogarithmus (Microsoft Excel) verdeutlichen.

Kranbahnträger werden durch alle acht Schnittgrößen beansprucht: Biegemomente um die y- und z- Achse, Querkräfte in y- und z- Achse, Normalkraft, primäres und sekundäres Torsionsmoment und dem Wölbbimoment.

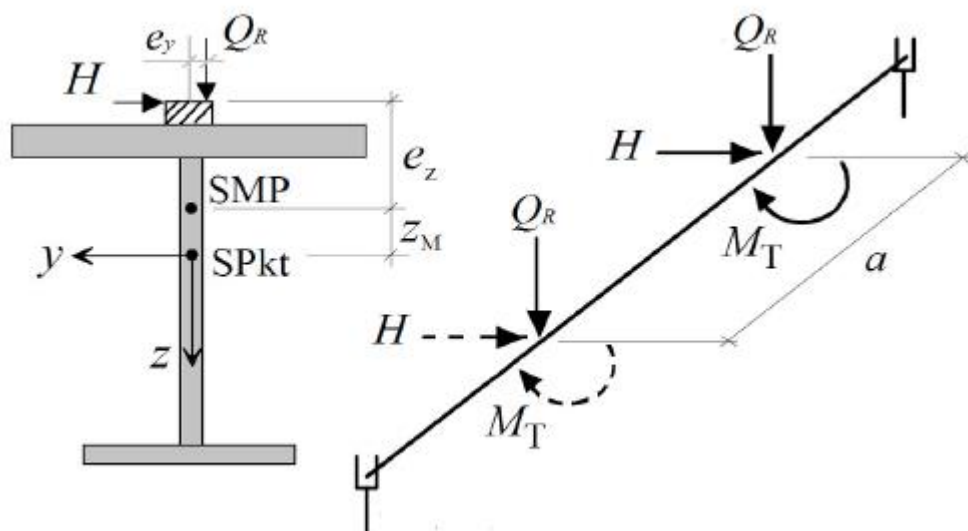


Abb. 6: Belastung einer Kranbahn

4.1 Culmannsche Laststellung: Hauptbiegung M_y

Karl Culmann (1821-1881) entdeckte, dass der Ort des maximalen Biegemomentes einer Wanderlastgruppe (mit konstantem Achsabstand) auf einem Einfeldträger nicht zwangsläufig in der Trägermitte ist.

Die Hauptbiegung M_y wird durch die vertikalen Kranlasten hervorgerufen.

Culmannsche Laststellung: ($F_1 \geq F_2$) $x = \frac{l}{2} - \frac{c}{2}$ mit $c = a \cdot \frac{F_2}{\sum F}$

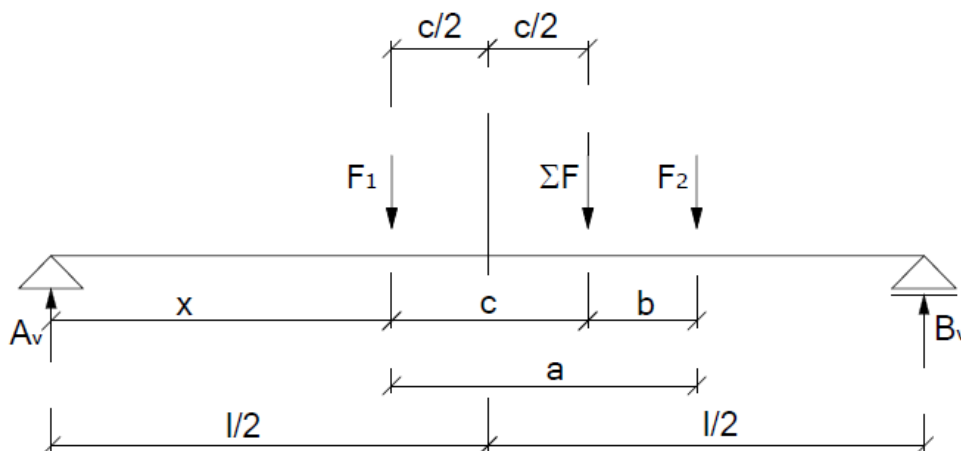


Abb. 7: Culmannsche Laststellung

Resultierendes Moment:

$$M_{y,k,1} = A_v \cdot x \quad \text{mit} \quad A_v = \frac{l - x - c}{l}$$

Für den Fall, dass der Achsabstand a größer oder gleich der halben Spannweite l ist ($a \geq l/2$), dann könnte auch die Laststellung in Trägermitte maßgebend werden. Auf diese Laststellung wird hier nicht weiter eingegangen.

4.2 Lokale Biegung $M_{z,\text{lokal}}$

Die lokale Biegung $M_{z,\text{lokal}}$ wird für den Berechnungslogarithmus mit Microsoft Excel vereinfacht und auf der sicheren Seite liegend berechnet.

Der Horizontalverband, zusammen mit dem Obergurt des Hauptträgers, übernimmt komplett die Querbiegung aus den horizontalen Kranlasten H . Somit wird nun ein Mehrfeldträger als Berechnungsgrundlage herangezogen. Die Spannweite entspricht der Verbandteilung. Die Horizontalkraft kann mit einem Zusatzfaktor multipliziert werden:

$$\text{Faktor } M_z: \frac{(\text{Stelle } \max M_y - \text{Auflager davor}) \cdot (\text{Auflager danach} - \text{Stelle } \max M_y)}{(\text{Auflager danach} - \text{Auflager davor})}$$

$$M_{z,\text{lokal}} = H \cdot \text{Faktor } M_z$$

4.3 Gurtnormalkraft $N_{H,OG}$

Gurtnormalkraft aus der Wirkung des Obergurtes als Gurt des Horizontalverbands:
(z.B. Kraft H_s aus Schräglaufl)

$$\sum M_A = 0 = x \cdot H_s - B \cdot l$$

$$\sum M_1 = 0 = (l - x) \cdot B + b \cdot N_{H,OG}$$

$$N_{H,OG} = \frac{(l - x) \cdot B}{b}$$

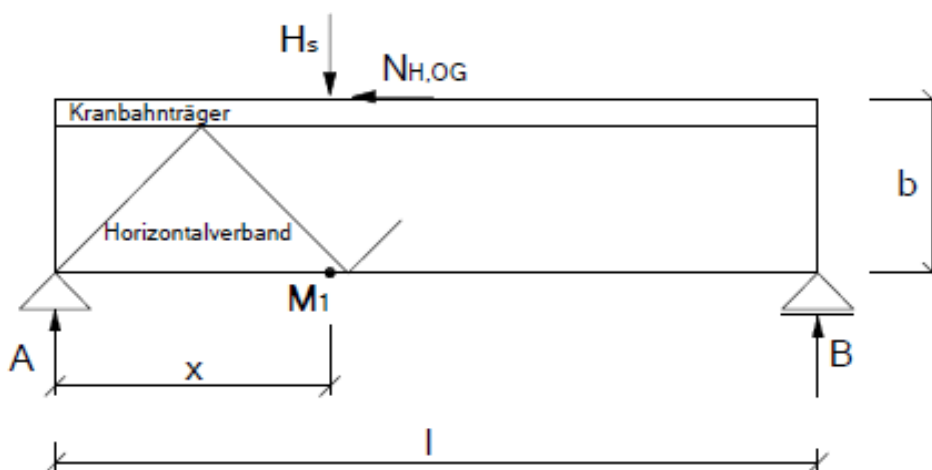


Abb. 8: Gurtnormalkraft

Aus Vereinfachungsgründen wird der Schnitt durch den Verbandstab nicht durchgeführt.

5 Nachweisführung

5.1 Tragfähigkeitsnachweise

Abb. 9 zeigt typische Nachweisstellen für den Spannungsnachweis:

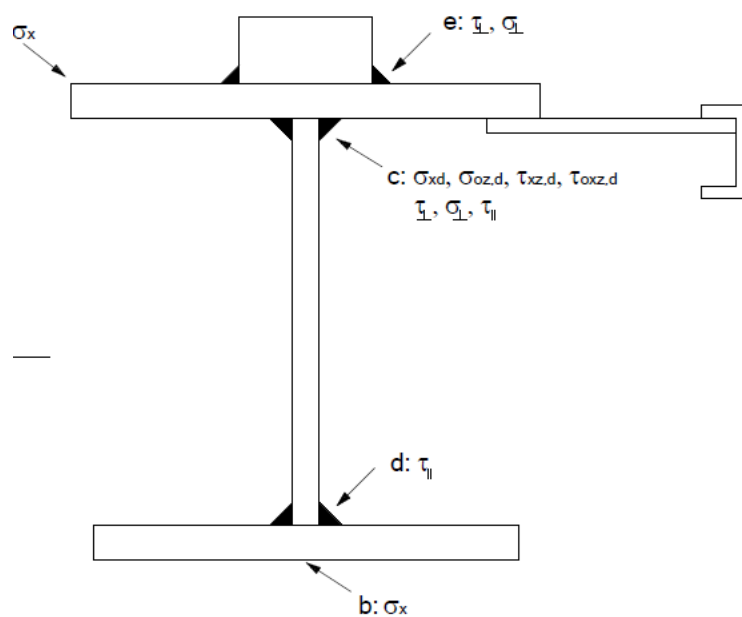


Abb. 9: Nachweisstellen

5.1.1 Grundwerkstoff

a) Normalspannung an einer oberen Flanschecke

Kranbahnträger werden, wie in Abschnitt 4 schon bekannt, durch zweiachsige Biegung und Torsion beansprucht. Dieses Problem kann man durch eine einfache Methode, dem Tragwirkungssplitting, lösen. Die Horizontallast H wird nur dem Obergurt und $1/5$ des Steges + dem Horizontalverband zugewiesen (Abb. 10).

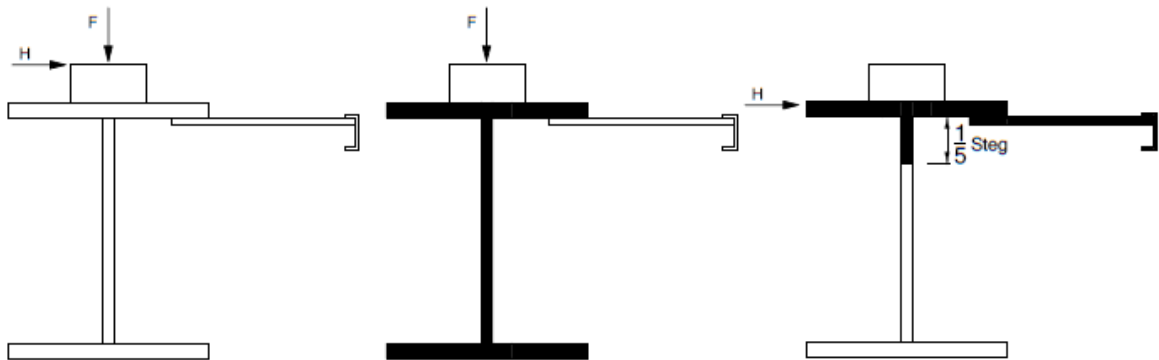


Abb. 10: Tragwirkungssplitting

Für Kranbahnträger mit Horizontalverband bedeutet dies im Einzelnen:

- Der Hauptträger übernimmt die Hauptbiegung $M_{y,d}$ aus den vertikalen Kranlasten (siehe Abschnitt 4.1).
- Dem Horizontalträger (Obergurt + Horizontalverband) wird nur die Querbiegung $M_{z,d}$ aus der Horizontallast H zugewiesen (siehe Abschnitt 4.2).

Wenn die Gurtnormalkraft $N_{H,Og,d}$ (siehe Abschnitt 4.3) aus der Wirkung des Obergurtes als Gurt des Horizontalverbands noch berücksichtigt wird, kann der Querschnittsnachweis wie folgt lauten:

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{y0}} + \frac{M_{z,d}}{I_{z,OG}} \cdot y + \frac{N_{H,Og,d}}{ADG} \leq f_{y,d}$$

W_{y0} ... Widerstandsmoment des Obergurtes bezogen auf die y- Achse

$I_{z,OG}$... Flächenträgheitsmoment des Obergurtes um die z- Achse

ADG ... Querschnittsfläche des Obergurtes + $1/5$ Steg

b) Normalspannung an einer Flanschunterseite

Die Normalspannung aus den maximalen Vertikallasten tritt an der Stelle des maximalen Feldmoments auf:

$$\sigma_{x,d} = \frac{\max M_{y,d}}{W_{yu}}$$

W_{yu} ... Widerstandsmoment des Untergurtes bezogen auf die y- Achse

c1) Spannungskomponenten an der Stegoberkante

Die Lasteinleitungsspannung im Stegansatz aus der Radlastpressung wird für geschweißte I-Profile wie folgt berechnet:

$$\sigma_{\text{oz,d}} = \frac{\max F_{\text{z,d}}}{t_{\text{w}} \cdot l_{\text{eff}}}$$

t_{w} ... die Dicke des Stegblechs

$F_{\text{z,d}}$ ist der Bemessungswert der vertikalen Radlast. Die Länge l_{eff} wird nach [3-6/5.7.1 Tab. 5.1] berechnet.

Fall	Beschreibung	Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}
(a)	Kranschiene schubstarr am Flansch befestigt	$l_{\text{eff}} = 3,25 [I_{\text{ff}} / t_{\text{w}}]^{1/3}$
(b)	Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt	$l_{\text{eff}} = 3,25 [(I_{\text{r}} + I_{\text{f,eff}}) / t_{\text{w}}]^{1/3}$
(c)	Kranschiene auf einer mind. 6mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage	$l_{\text{eff}} = 4,25 [(I_{\text{r}} + I_{\text{f,eff}}) / t_{\text{w}}]^{1/3}$
$I_{\text{f,eff}}$	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}	
I_{r}	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie der Schiene	
I_{ff}	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnitts einschließlich der Schiene und des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}	
t_{w}	Stegdicke	
$b_{\text{eff}} = b_{\text{ff}} + h_{\text{r}} + t_{\text{f}}$ aber $b_{\text{eff}} \leq b$		
Dabei ist		
b	die Gesamtbreite des Obergurtes;	
b_{ff}	die Breite des Schienenfußes, siehe Bild 5.2;	
h_{r}	die Schienenhöhe, siehe Bild 5.1;	
t_{f}	die Flanschdicke.	
ANMERKUNG Der Verschleiß der Kranschiene wird bei der Bestimmung von I_{r} , I_{ff} und h_{r} berücksichtigt, siehe 5.6.2(2) und 5.6.2(3).		

Tabelle 7: Effektive Lastausbreitungslänge

Die zur Radlastpressung gehörigen Schubspannungen sind mit 20 % der Radlastpressung zu berücksichtigen.

$$\tau_{\text{oxz,d}} = 0,2 \cdot \sigma_{\text{oz,d}}$$

Der Vergleichsspannungsnachweis am Übergang von Flansch zu Steg unter Beachtung der Lasteinleitungsspannung und der globalen Tragwirkung lautet:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{x,d}}}{\sigma_{\text{R,d}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{oz,d}}}{\sigma_{\text{R,d}}} \right)^2 - \frac{\sigma_{\text{x,d}}}{\sigma_{\text{R,d}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{oz,d}}}{\sigma_{\text{R,d}}} + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{\text{oxz,d}} + \tau_{\text{xz,d}}}{\sigma_{\text{R,d}}} \right)^2 < 1$$

$\sigma_{\text{x,d}}$... Normalspannung aus der globalen Tragwirkung z.B.:

$$\sigma_{\text{x,d}} = \frac{M_{\text{y,d}}}{W_{\text{yo}}} + \frac{N_{\text{H,Og,d}}}{A_{\text{DG}}}$$

$\tau_{xz,d}$... Schubspannung aus der globalen Tragwirkung z.B.:

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{z,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s}$$

5.1.2 Schweißnähte

c2) Normal- und Schubspannung der oberen Halsnaht

Die obere Halskehlnaht sollte aus Ermüdungsgründen als durchgehende Stumpfnahnt ausgeführt werden. Falls die Halsnaht doch als Doppelkehlnaht ausgeführt wird, darf kein Kontakt zwischen Flansch und Steg unterstellt werden.

Spannungen durch zentrisch angreifende vertikale Radlasten:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\max F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_o \cdot l_{eff}}$$

l_{eff} ... effektive Lastausbreitungslänge

a_o ... Schweißnahtdicke der oberen Halsnaht

$F_{z,d}$... max. vertikale Radlast

Spannungen aus dem Querkraftschub:

$$\tau_{\parallel} = \frac{\max V_{z,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot 2 \cdot a_o}$$

$S_{y,OG}$... Statisches Moment Obergurt

$V_{z,d}$... max. Querkraft

Bei Kehl- und Stumpfnähten muss σ_{\parallel} nicht nachgewiesen werden. [3-1-8,4.5.3.2 (5)]

Nachweis kann nach [3-1-8/4.5] geführt werden.

d) Schubspannung der unteren Halsnaht

Die untere Halsnaht kann als normale Doppelkehlnaht ausgeführt werden, da diese nicht durch Lasteinleitung beansprucht wird. Demzufolge wird die Naht nur durch Querkraftschub beansprucht.

$$\tau_{\parallel} = \frac{\max V_{z,d} \cdot S_{y,UG}}{I_y \cdot 2 \cdot a_u}$$

Nachweis kann nach [3-1-8/4.5] geführt werden.

e) Spannungen in den Schienenkehlnähten

Der Schienenquerschnitt wird in diesen Ausführungen als statisch nicht mitwirkend betrachtet. Die vertikale Radlast wird ausschließlich über die Kehlnähte übertragen. Es werden drei verschiedene Ausführungen unterschieden:

- durchgehende Schweißnaht
- unterbrochene Naht, gegenüberliegende Anordnung
- unterbrochene Naht, versetzte Anordnung

Die effektive Lastausbreitungslänge l_{eff} wird nach Tabelle 7 berechnet. Bei einem Lastausbreitungswinkel von 45° wird die Lastausbreitungslänge in Höhe der Schweißnaht wie folgt berechnet: $l = l_{\text{eff}} - 2 \cdot t_r$

Für die durchgehende Schweißnahtanordnung ergeben sich folgende Spannungen:

$$\begin{aligned} \max \tau_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} + \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ \text{zu } \sigma_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} - \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ \tau_{\parallel} &= 0 \quad \text{da nicht mittragende Schiene} \end{aligned}$$

Bei der unterbrochenen Naht muss kontrolliert werden, welche Länge zur Lastabtragung maßgebend wird: Minimum (Nahtabschnitt l_w ; Lastausbreitung l). Dies gilt nur für den horizontalen Spannungsanteil. Für den vertikalen Spannungsanteil ist die Lastausbreitung l generell anzunehmen, da bei $l_w < l$ ein Kontakt zwischen Schiene und Flansch unterstellt wird.

Für die gegenüberliegende Schweißnahtanordnung ergeben sich folgende Spannungen:

$$\begin{aligned} \max \tau_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} + \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot \min(l, l_w)} \\ \text{zu } \sigma_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} - \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot \min(l, l_w)} \end{aligned}$$

Bei der versetzten Anordnung muss ein einzelner Nahtabschnitt die Horizontallasten aufnehmen.

$$\begin{aligned} \max \tau_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} + \frac{H_d}{1 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot \min(l, l_w)} \\ \text{zu } \sigma_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} - \frac{H_d}{1 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot \min(l, l_w)} \end{aligned}$$

Die erforderlichen Nachweise können nach [3-1-8/4.5] geführt werden.

5.2 Stabilitätsnachweise

5.2.1 Biegedrillknicken – Knicken des Obergurtes

Das Verfahren „Knicken des Obergurtes“ soll als Ersatz von aufwändigen, genaueren Nachweisverfahren dienen. Die Idee ist ein einfaches, von Hand ausführbares, Biegeknick-Problem zu realisieren. Es wird nur der Druckgurt + 1/5 Steg als Knickstab angesehen. Für den speziellen Fall Kranbahnträger mit Horizontalverband ist die Verbandteilung gleich die Knickstablänge. Der Nachweis wird nach [3-1-1/6.3.3] geführt.

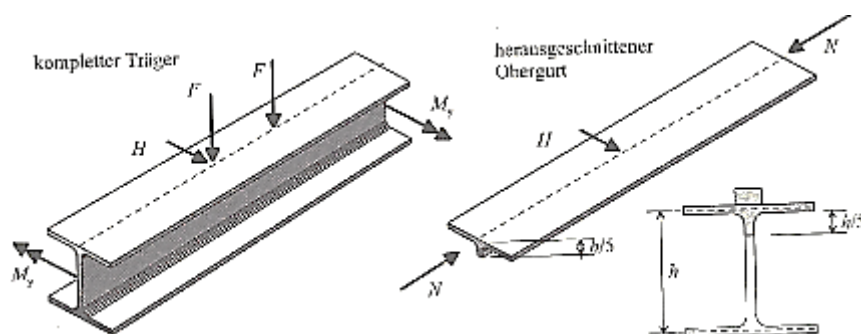


Abb. 11: Biegedrillknicken – Knicken des Obergurtes

5.2.2 Beulnachweise

Die Beulnachweise können nach dem Verfahren der wirksamen Querschnitte [3-1-5, 4-7] geführt werden.

Das Stegblech wird durch globale Längsspannungen (aus der Hauptbiegung M_y + der Gurtnormalkraft $N_{H,Og,d}$) und lokaler Spannung (aus Radlastpressung) besonders stark beansprucht.

5.2.2.1 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast

Der Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast schließt folgende Nachweise mit ein:

- Plastisches Stauchen des Steges
- Stegkrüppeln
- Beulen des Gesamtfeldes unter Querlasten

Der Beulnachweis für die Querspannung lautet:

$$\eta_2 = \frac{\max F_{z,d} \cdot \gamma M_1}{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w}$$

$F_{z,d}$... Bemessungswert der vertikalen Radlast

L_{eff} ... wirksame Länge für die Beanspruchbarkeit auf lokales Beulen

t_w ... Stegblechdicke

Das Plattenbeulen für Längsspannungen nach [3-1-5, 4] wird wie folgt formuliert:

$$\eta_1 = \frac{N_{H,Og,d} \cdot \gamma M_1}{f_y \cdot A_{DG}} + \frac{N_{L,d} \cdot \gamma M_1}{f_y \cdot A} + \frac{M_{y,d} \cdot \gamma M_1}{f_y \cdot W_{yo}}$$

$N_{H,Og,d}$... Bemessungswert der Gurtnormalkraft

$M_{y,d}$... Bemessungswert der Hauptbiegung

$N_{L,d}$... Normalkraft (kann vernachlässigt werden)

Die Interaktion zwischen η_1 und η_2 wird nachgewiesen durch:

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 \leq 1,4$$

5.2.2.2 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

Um das Einknicken des Druckflansches in den Steg zu vermeiden, sollte das Verhältnis h_w/t_w des Stegs folgendes Kriterium erfüllen. [3-1-5/8]:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{h_w \cdot t_w}{b_f \cdot t_f}} \quad k = 0,55 \quad \left(\begin{array}{l} \text{wenn nur die elastische Querschnitts-} \\ \text{tragfähigkeit ausgenutzt wird} \end{array} \right)$$

$b_f \cdot t_f$... Fläche des Druckflansches

5.3 Ermüdungsnachweise

Die Ermüdungsnachweise werden nach EC 3-1-9 geführt und basieren auf dem einfach anwendbaren Nennspannungskonzept. Bei komplexeren Spannungszuständen kann das Strukturspannungskonzept oder die Bruchmechanik herangezogen werden.

5.3.1 Grundlagen

- Einwirkungen

Einwirkungen und Einwirkungskombinationen werden in Abschnitt 3.2 und 3.3.3 erläutert. Bei den Beanspruchungsklassen S₃ bis S₉ muss aus der Radlastexzentrizität die Spannung aus der Stegbiegung berücksichtigt werden.

- Teilsicherheitsbeiwerte:

Auf der Einwirkungsseite beträgt der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Ff} = 1,0$ [3-6NA/9.2(1)].

Der Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandseite ist von dem Zuverlässigkeitskonzept abhängig. In der Regel werden Krahnbahnen schadenstolerant entworfen, d.h. wenn Ermüdungsrisse sich lokal auswirken können, und durch entsprechende Inspektionsprogramme die Bauteile instand gesetzt werden.

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} ist also abhängig von der Anzahl der Inspektionsintervalle:

Anzahl i der Inspektionsintervalle	Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf}
1	1,60
2	1,35
3	1,15
4	1,00

Tabelle 8: Erforderliche Anzahl von Inspektionsintervallen nach [3-6NA/Tab.NA.3]

- Berechnung der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma_x$$

$\Delta\sigma_x$... Spannungsschwingbreite, Differenz aus der max. und min. Spannung

λ ... schadensäquivalenter Beiwert nach [1-3/Tab.2.12]

Klassen S	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Normalspannung	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,000	1,260	1,587
Schubspannung	0,397	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,000	1,149	1,320

Tabelle 9: Schadensäquivalente Beiwerte nach [1-3/Tab.2.12]

- Bestimmung der Kerbfälle:

Die Kerbfälle werden nach den Tabellen [3-1-9/Tab.8.1 – 8.10] bestimmt. Dabei ist die Kerbfallnummer gleichzeitig die ertragbare Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_c$.

Beispiel:

Kerbklasse 63 Bezugswert: $\Delta\sigma_c = 6,3 \text{ kN/cm}^2$

- Ermüdungsnachweise nach [3-1-9/8]:

Für Längsspannung:

$$\frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{MF}} \leq 1,0$$

Für Schubspannung:

$$\frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{MF}} \leq 1,0$$

Bei gleichzeitiger Wirkung:

$$\left(\frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{xE,2}}{\Delta\sigma_{xc} / \gamma_{MF}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{zE,2}}{\Delta\sigma_{zc} / \gamma_{MF}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{MF}} \right)^5 \leq 1$$

- Besonderheit bei dem Nachweis der Radlasteinleitungsspannung:

Da bei einer Überfahrt eines zweiachsigen Krans es zu zwei Lastwechseln kommt, muss dies im Ermüdungsnachweis berücksichtigt werden (pro Rad eine Spannungsspitze). Die Beanspruchungsklasse wird um eins erhöht: $S_i \rightarrow S_{i+1}$. Somit erhöht sich der schadensäquivalente Beiwert und der Nachweis kann analog wie oben geführt werden.

- Besonderheit bei dem Nachweis der Schweißnahtspannungen:

Die Schweißnahtspannungen sind auf die Winkelschenkel der Nähte bezogen zu berechnen (siehe Abb.12).

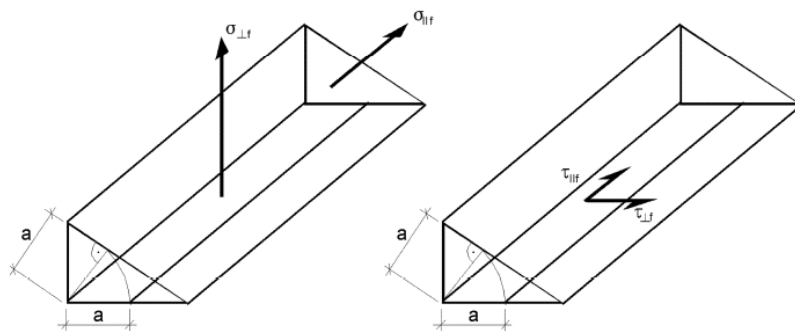


Abb. 12: Maßgebende Spannungen in Kehlnähten nach [3-1-9/5]

5.3.2 Typische Nachweisstellen und Kerbfälle

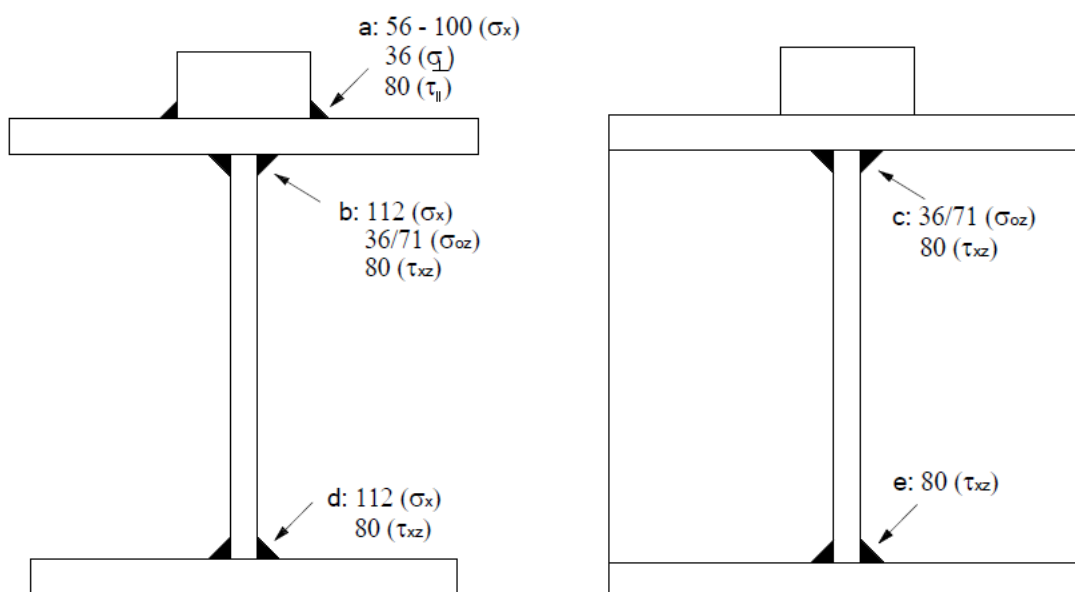


Abb. 13: Beispiele typischer Kerbfälle für Kranbahnträger aus Dreiblechquerschnitten

σ_x ... Normalspannung aus globaler Tragwirkung

σ_{oz} ... Radlasteinleitungsspannung

τ_{xz} ... Schubspannung aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung

σ_\perp $\tau_{||}$... Spannungen an der Schweißnahtunterkante

Kerbfall	
56-80	[3-1-9/Tab.8.5] Fall 1
100	[3-1-9/Tab.8.2] Fall 5
112	[3-1-9/Tab.8.2] Fall 3
80	[3-1-9/Tab.8.5] Fall 8
36/71	[3-1-9/Tab.8.10]

Tabelle 10: Kerbfälle nach [3-1-9]

Die Schienenoberkante wird nicht weiter untersucht, da diese Stelle in den Kerbfall 160 eingestuft wird und damit unkritisch für den Ermüdungsnachweis ist.

5.4 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Mit den Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird ein störungs-freier und verschleißarmer Kranbetrieb sichergestellt.

- Die Begrenzung der vertikalen Verformung erfolgt nach [3-6/Tab.7.2]

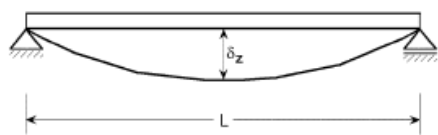
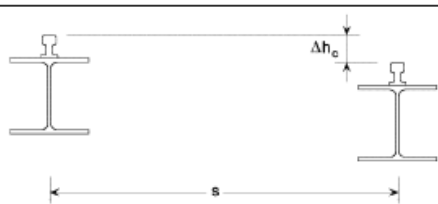
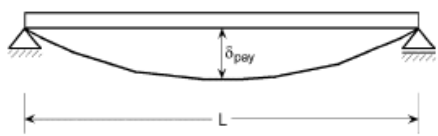
Beschreibung der Verformung (Durchbiegung und Verschiebung)	Skizze
a) Vertikale Durchbiegung δ_z eines Kranbahnträgers: $\delta_z \leq L/600$ und $\delta_z \leq 25 \text{ mm}$ Die vertikale Durchbiegung δ_z sollte als Gesamtdurchbiegung infolge vertikaler Lasten abzüglich möglicher Überhöhungen, analog zu δ_{\max} in EN 1990, Bild A1.1 bestimmt werden.	
b) Differenz Δh_c der vertikalen Durchbiegung zweier benachbarter Träger, die eine Kranbahn bilden: $\Delta h_c \leq s/600$	
c) Vertikale Durchbiegung δ_{pay} infolge der Nutzlast eines Kranbahnträgers bei einer Unterflansch-Laufkatze: $\delta_{\text{pay}} \leq L/500$	

Tabelle 11: Grenzwerte für vertikale Verformungen nach [3-6/Tab.7.2]

- Die vertikale Durchbiegung wird wie folgt berechnet:

aus Radlast:

$$c < 0,65 \cdot l: \quad \delta_{z,1} = \frac{F \cdot (l - a) \cdot (3 \cdot l^2 - (l - a)^2)}{48 \cdot E \cdot I_y}$$

$$c \geq 0,65 \cdot l: \quad \delta_{z,2} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_y}$$

aus Eigengewicht:

$$\delta_{z,g} = 0,013 \cdot \frac{g \cdot l^4}{E \cdot I_y}$$

- Die Begrenzung der horizontalen Durchbiegung erfolgt nach [3-6/Tab.7.1] und bezieht sich nur auf die Schienenoberkante.

Beschreibung der Verformung (Durchbiegung oder Verschiebung)	Skizze
a) Horizontale Durchbiegung δ_y eines Kranbahnträgers in Höhe der Oberkante Kranschiene: $\delta_y \leq L/600$	
b) Horizontale Verschiebung δ_y eines Tragwerks (oder einer Stütze) in Höhe der Kранаuf Lagerung: $\delta_y \leq h_c/400$ Dabei ist h_c der Abstand zu der Ebene, in der der Kran gelagert ist (auf einer Kranschiene oder auf einem Flansch)	
c) Differenz $\Delta\delta_y$ der horizontalen Verschiebungen benachbarter Tragwerke (oder Stützen), auf denen Träger einer innen liegenden Kranbahn lagern. $\Delta\delta_y \leq L/600$	
d) Differenz $\Delta\delta_y$ der horizontalen Verschiebungen benachbarter Stützen (oder Tragkonstruktionen), auf denen Träger einer außen liegenden Kranbahn lagern: – infolge der Lastfallkombination von seitlichen Krankräften und Windlast während des Betriebes: $\Delta\delta_y \leq L/600$ – infolge Windlast außer Betrieb: $\Delta\delta_y \leq L/400$	
e) Änderung des Abstandes Δ_s der Schwerlinien der Kranschinen, einschließlich der Auswirkungen von Temperaturänderungen: $\Delta_s \leq 10 \text{ mm}$ [siehe Anmerkung]	

Tabelle 12: Grenzwerte für horizontale Verformungen nach [3-6/Tab.7.1]

ANMERKUNG Horizontale Verformungen und Abweichungen von Kranbahnträgern werden bei der Berechnung von Kranbahnen gemeinsam berücksichtigt. Die zulässigen Verformungen und Toleranzen sind abhängig von der Detaillausbildung und den Abständen der Kranführungsmittel. Unter der Voraussetzung, dass das Spiel c zwischen Spurkranz und Kranschiene (oder zwischen anderen Führungsmitteln und dem Kranbahnträger) ausreichend ist, um die erforderlichen Toleranzen aufzunehmen, können nach Vereinbarung zwischen dem Kranhersteller und dem Bauherrn auch größere Verformungsgrenzwerte für die einzelnen Projekte vereinbart werden.

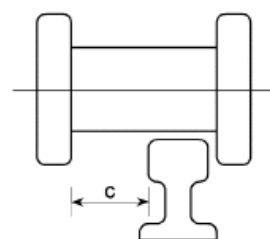


Tabelle 13: Fortsetzung

• Berechnung der horizontalen Durchbiegung:

Für den speziellen Fall „Kranbahnträger mit Horizontalverband“ kann der Kranbahnträger in horizontaler Richtung als Mehrfeldträger angesehen werden. Sinnvoll zur Berechnung der Durchbiegung ist die Verwendung geeigneter Software. Näherungsweise kann die Berechnung mit dem Prinzip des Tragwirkungssplittings erfolgen (Horizontallast wird dem Obergurt + 1/5 Steg zugewiesen). Die Ausführungen werden hier nicht erläutert.

• Weitere Begrenzungen sind das Stegblechatmen um sichtbares Beulen zu vermeiden ($b/t_w \leq 120$) und die Begrenzung der Schwingungen des Unterflansches ($L/i_z \leq 250$). Die beiden Nachweise sind oft nicht kritisch.

6. Grundlagen der Excel-Programmierung

6.1 Grundprinzip

Die Programme sind einfach zu handhabende Excel-Tools, um schnell und damit effektiv Nachweise zu führen. Der Berechnungslogarithmus wird dabei ausführlich und komplett sichtbar fortlaufend aufgeführt. Das Ziel ist, ein Eingabefeld und eine Zusammenfassung der gesamten geführten Nachweise zu erzeugen. Dies wird als Druckdokument gespeichert und kann ausgedruckt werden. Wird die komplette Nachweisführung verlangt, kann der Druckbereich erweitert werden. Der Aufbau der Programme wird also in drei Teile unterteilt:

- Eingaben
- Zusammenfassung
- komplette Nachweisführung

Kranbahnträger als Schweißprofilträger für "schweren Kranbetrieb"		27.10.2015
Allgemeine Angaben zu Kran und Kranbahnträger:		
- Zweiträgerbrücken mit Schlingerverband und Hakenbetrieb		
- Einfeldträger		
- Räder können den Träger verlassen		
Vorgaben des Bauherrn:		
- Hubklasse	HC	
- Beanspruchungsklasse	S	
- Inspektionsintervalle	3	
Angaben zum Kran: (Herstellerangaben)		
- Vertikale Radlasten:		
- Achse 1 Hublast	Q _{h,1} = 100,0	
- Achse 1 Eigengewicht	Q _{o,1} = 70,0	
- Achse 2 Hublast	Q _{h,2} = 100,0	
- Achse 2 Eigengewicht	Q _{o,2} = 70,0	
- Horizontale Radlasten		
- aus Schräglauf Achse 1	H _s = 55,9	
- aus Beschleunigen und Bremsen		
- längs zur Fahrbahn	H _L = 24,5	
- quer zur Fahrbahn	H _T = ± 25	
- Kran-Fahrgeschwindigkeit		
- Hubgeschwindigkeit	v _H = 5,0 m	
- Radstand	a = 2000,0	
- Kranfahrwerkssystem	IF	
Zusammenfassung 1. Belastung 2. Schnittgrößen 3. Nachweise 3.1 Tragfähigkeitsnachweise 3.1.2 Grundwertstoff 3.1.2.1 Maximales Fektmoment • Biegespannung $\sigma_{b,Ed} = -16,7$ $\sigma_{b,Rd} = 35,5$ • max. Stegnormalspannung aus Radlastentlastung $\sigma_{b,Ed} = -15,3$ $\sigma_{b,Rd} = 35,5$ • max. Vergleichsspannungen am Übergang Flansch zu Steg Einwirkungskombination 1 Laststellung maximales Moment: $(\frac{10,41}{35,5})^2 + (\frac{15,30}{35,5})^2 + (\frac{10,41}{35,5})^2 + (\frac{15,30}{35,5})^2 + 3 \cdot (\frac{3,06 + 2,47}{35,5})^2$ Laststellung Aufgängerseite (maximale Querkraft): $(\frac{15,30}{35,5})^2 + 3 \cdot (\frac{3,06 + 4,98}{35,5})^2$ Einwirkungskombination 5 Laststellung maximales Moment: $(\frac{9,79}{35,5})^2 + (\frac{13,69}{35,5})^2 + (\frac{9,79}{35,5})^2 + (\frac{13,69}{35,5})^2 + 3 \cdot (\frac{2,74 + 2,18}{35,5})^2$ Laststellung Aufgängerseite (maximale Querkraft): $(\frac{13,69}{35,5})^2 + 3 \cdot (\frac{2,74 + 4,44}{35,5})^2$ 3.1.2.2 Maximale Eckspannung im Obergurt Einwirkungskombination 1 $\sigma_{b,Ed} = -12,7$ $\sigma_{b,Rd} = 35,5$ Einwirkungskombination 5 $\sigma_{b,Ed} = -14,9$ $\sigma_{b,Rd} = 35,5$ 3.1.2.3 Maximale Querkraft $T_{d,Ed} = -5,6$ $T_{d,Rd} = 20,5$ 3.1.3 Schweißnähte Oberer Halsnaht $\sigma_{b,Ed} = -24,3$ $\sigma_{b,Rd} = 43,5$ $\sigma_{\perp} = 11,6 \text{ kN/cm}^2 < 0,9 \cdot 1,25$ Untere Halsnaht $\sigma_{b,Ed} = -6,4$ $\sigma_{b,Rd} = 43,5$ Schienenerschweißnaht Einwirkungskombination 1 $\sigma_{b,Ed} = -37,3$ $\sigma_{b,Rd} = 43,5$ $\sigma_{\perp} = 20,7 \text{ kN/cm}^2 < 0,9 \cdot 1,25$		
3.1.2.2 Maximale Eckspannung im Obergurt Einwirkungskombination 1 $\sigma_{b,Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{pl,y}} + \frac{M_{Ed}}{I_{yy}} \cdot y + \frac{N_{Ed}}{A}$ $\sigma_{b,Ed} = \frac{557,9}{5572} + \frac{100}{13333,3} \cdot 20 + \frac{29,0}{116,7} = 12,37 \text{ kN/cm}^2$ → Nachweis: $\frac{\sigma_{b,Ed}}{\sigma_{b,Rd}} = \frac{12,37}{35,5} = 0,35 < 1$ Einwirkungskombination 5 $\sigma_{b,Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{pl,y}} + \frac{M_{Ed}}{I_{yy}} \cdot y + \frac{N_{Ed}}{A}$ $\sigma_{b,Ed} = \frac{492,9}{5572} + \frac{100}{13333,3} \cdot 20 + \frac{110,1}{116,7} = 14,03 \text{ kN/cm}^2$ → Nachweis: $\frac{\sigma_{b,Ed}}{\sigma_{b,Rd}} = \frac{14,03}{35,5} = 0,40 < 1$ 3.1.2.3 Maximale Querkraft • max. Steg Schubspannung tritt in EK1 auf: $T_d = \frac{\max V_{Ed}}{I_y} \cdot S_{y,0} = \frac{441,1}{124879,3} \cdot \frac{2413,5}{2} = 5,68 \text{ kN/cm}^2$ → Nachweis: $\frac{T_d}{T_{d,Rd}} = \frac{5,68}{20,50} = 0,28 < 1$ 3.1.3 Schweißnähte Oberer Halsnaht Richtungsbezogenes Verfahren $\sigma_{\perp} = T_{\perp} = \frac{\max F_{Ed}}{2 \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{e}} = \frac{256,5}{2 \cdot \sqrt{0,7} \cdot \sqrt{11,2}} = 11,59 \text{ kN/cm}^2$ $T_{\parallel} = \frac{\max V_{Ed}}{I_y} \cdot \frac{S_{y,0}}{2} = \frac{441,1}{124879,3} \cdot \frac{2116,1}{2} = 5,34 \text{ kN/cm}^2$ $\sigma_{b,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + T_{\parallel}^2} = \sqrt{11,59^2 + 5,34^2} = 12,96 \text{ kN/cm}^2$ → Nachweis: $\frac{\sigma_{b,Ed}}{\sigma_{b,Rd}} = \frac{12,96}{43,56} = 0,57 < 1$ $\sigma_{\perp} = 11,6 \text{ kN/cm}^2 < 0,9 \cdot \frac{f_y}{1,25} = 0,9 \cdot \frac{49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$		

Abb. 14: Eingaben, Zusammenfassung, Auszug aus der kompletten Nachweisführung

6.2 Werkzeuge der Excel-Programmierung

In diesem Abschnitt sollen kurz die wichtigsten verwendeten Excel-Werkzeuge erläutert werden. Die Programme wurden mit der Excel Version 2013; Microsoft Corporation erstellt.

a) Grundeinstellung der Excel-Oberfläche

Nach dem Öffnen einer neuen Excel-Tabelle wird das Rastermaß geändert:

- Breite: 2 Skalenteile
- Höhe: 15 Skalenteile

Unter Optionen müssen weitere Einstellungen vorgenommen werden:

- Datei → Option → Menüband anpassen → Entwicklertools aktiv stellen
- Datei → Option → Add-Ins → Gehe zu... → Solver aktiv stellen

b) Grundfunktionen

Soll in einer Zelle eine Formel eingegeben werden: → „=“ beginnen

Soll ein Wert von einer anderen Tabelle verwendet werden: → „=Tabellenname +!“

Soll z.B. auf zwei Nachkommastellen gerundet werden: → „=runden(Zellenname;2)“

Soll der Absolutwert angegeben werden: → „=abs(Zahl)“

Weitere sehr häufig benutzte Funktionen sind die „wenn-Funktion“ und der „sverweis“.

- wenn-Funktion: → „=wenn(Bedingung; Dann; Sonst)“
- sverweis: → „=sverweis (Suchkriterium; Matrix; Spaltenindex; Bereich_Verweis)“

Ein kleines gewähltes Beispiel soll die verwendeten Grundfunktionen verdeutlichen:

Es soll die Lasteinleitungslänge l_{eff} (siehe 5.1.1) auf Höhe der Schienenschweißnaht umgerechnet werden. Die Lastausbreitungslänge l_{eff} auf Höhe der Flanschunterkante sei 15 cm, außerdem soll der Kranbahnträger aus der HEA-Profilreihe gewählt werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1																										
2					Kranbahnträger								HEA 220													
3																										
4																										
5					/eff = 15 cm																					
6																										
7					l = /eff - 2 · t = 15,0 - 2 · 1,1 = 12,8 cm																					
8																										

Abb. 15: Screenshot der Excel-Tabelle

Zelle N7: → „=G15“

Zelle Q7: → „2“

Zelle S7: → „=sverweis(K2;Profiltabellen!A44:AC67;24;FALSCH)/10“

Erläuterung der Zelle S7:



Abb. 16: Screenshot der Blattregisterkarten

In der Blattregisterkarte „Profiltabellen“ ist eine Datenbank aller üblichen Profilreihen hinterlegt. Die HEA Profilreihe ist in der Matrix A44:AC67 und die benötigte Flanschdicke in der Spalte 24 enthalten. Der Verweis FALSCH steht für genaue Übereinstimmung.

Zelle V7: → „=RUNDEN(N7-Q7*S7;1)“

Da laut Aufgabenstellung die gesamte HEA Profilreihe berücksichtigt wird, muss die Datenauflistung aktiviert werden.

- Unter Menü „Daten“ → „Datenüberprüfung“ → „Liste“ kann die benötigte Spaltenmatrix eingestellt werden.

c) Entwicklertools

Wenn die Programme übersichtlich und interaktiv gestaltet werden sollen, können Makros erstellt werden. So kann z.B. einer Grafik ein Makro zugewiesen werden:

- Entwicklertools → Makro aufzeichnen → auf „diese“ Arbeitsmappe zuschalten → Tabelle über die Blattregisterkarten wechseln → Aufzeichnung beenden → Grafik dem Makro zuweisen

Der Abschnitt 6.2 soll einen groben Einblick geben und stellt damit auch keinen Hauptpunkt dieser Arbeit dar.

7. Vergleich geschweißter Kranbahnträger

7.1 Optimierung von Kranbahnträgerquerschnitten

Im Folgenden soll an einem konkreten Beispiel das Excel-Programm aus Abschnitt 6 näher gezeigt werden. Darüber hinaus werden mathematische Optimierungslogarithmen angewendet, um die Querschnittsfläche so minimal wie möglich zu halten. Wie dem Abschnitt 2.2 zu entnehmen ist, können geschweißte Dreiblechquerschnitte mit ihren sechs Parametern an die Anforderungen besonders gut eingestellt werden.

- Aufgabenstellung:

Für einen Kranbahnträger mit Schlingerverband in einer Halle, der durch einen Zweiträger-Brückenkran befahren wird, sind die erforderlichen Tragfähigkeits-, Gebrauchstauglichkeits- und Ermüdungsnachweise zu führen. Wobei der Ermüdungsnachweis nicht im Vordergrund steht.

Vorgaben des Bauherrn:

- | | |
|-------------------------|-----|
| - Hubklasse | HC2 |
| - Beanspruchungsklasse | S1 |
| - Inspektionsintervalle | 3 |

Angaben zum Kran:

- | | | |
|--------------------------|-------------------------------|--------------|
| - Vertikale Radlasten: | | |
| | Achse 1 | Hublast |
| | | Eigengewicht |
| | Achse 2 | Hublast |
| | | Eigengewicht |
| - Horizontale Radlasten: | | |
| | aus Schräglaufl | |
| | aus Beschleunigen und Bremsen | |
- $Q_{h,1} = 120 \text{ kN}$
 $Q_{c,1} = 60 \text{ kN}$
 $Q_{h,2} = 120 \text{ kN}$
 $Q_{c,2} = 60 \text{ kN}$

 $H_s = 50 \text{ kN}$

	längs zur Fahrbahn	$H_L = 25 \text{ kN}$
	quer zur Fahrbahn	$H_T = 26 \text{ kN}$
- Hubgeschwindigkeit		$v_h = 5 \text{ m/min}$
- Radstand		$a = 4000 \text{ mm}$
- Kranfahrwerksystem		IFF
Statisches System:		
- einfeldrige Kranbahn		
- Spannweite		$l = 6000 \text{ mm}$
- Schlingerverband		
Verbandbreite		$b = 1000 \text{ mm}$
Verbandteilung		$t = 2000 \text{ mm}$
Kranschiene:		
- Schienenform		Flachstahlschiene

• Um die Optimierung des Dreiblechquerschnitts zu verdeutlichen, soll zunächst der Kranbahnträgerquerschnitt aus der HEA Profilreihe gewählt werden. Da das Excel-Programm keine Profilreihen berücksichtigt, werden laut Profiltabelle die sechs Parameter sinngemäß eingestellt. Der komplette Berechnungslogarithmus kann in den Anlagen nachvollzogen werden (siehe Anlage 1).

• Zusammenfassung der geführten Nachweise:

HEA 400

Biegespannung	55 %
Stegnormalspannung	45 %
Vergleichsspannung	52 %
Eckspannung im Obergurt	86 %
Knicken des Obergurtes	92 %
Beulnachweis	53 %
Ermüdungsnachweis	11 %
Nachweis im GZG	79 %

Tabelle 14: Nachweiszusammenfassung HEA 400

HEA 360

Biegespannung	67 %
Stegnormalspannung	49 %
Vergleichsspannung	70 %
Eckspannung im Obergurt	101 %
Knicken des Obergurtes	107 %
Beulnachweis	64 %
Ermüdungsnachweis	18 %
Nachweis im GZG	108 %

Tabelle 15: Nachweiszusammenfassung HEA 360

→ gewähltes Profil: HEA 400 mit einer Querschnittsfläche von $152,7 \text{ cm}^2$.
(der Ausrundungsradius wird nicht berücksichtigt)

• Optimierung mit Excel 2013

Um Optimierungsprobleme mit Excel lösen zu können, wird der *Solver* benötigt. Beim *Solver* handelt es sich um ein Add-In (ein Add-In ist ein separates Zusatzprogramm), das prinzipiell wie die Zielwertsuche funktioniert, bei dem noch zusätzlich Nebenbedingungen angegeben werden können.

Bevor der Solver das erste Mal eingesetzt werden kann, muss das Add-In installiert werden. Die kurze Schrittfolge lautet:

→ Register Daten → Schaltfläche Optionen → Kategorie Add-In → Schaltfläche „Gehe zu...“ → Kontrollkästchen Solver aktiv setzen → der Solver taucht nun im Register Daten auf

Der Solver besteht aus drei Elementen:

- Zielfunktion
- Optimierungsvariablen
- Nebenbedingungen

• Zielfunktion (Ziel festlegen):

Bei der Zielzelle muss es sich um eine Tabellenzelle handeln, in der eine Berechnung durchgeführt wird. Wie oben beschrieben, soll die Querschnittsfläche so minimal wie möglich ausgegeben werden. Die zu minimierende Funktion lautet:

$$Z(x) = A = x_1 \cdot x_2 + x_3 \cdot x_4 + x_5 \cdot x_6$$

• Optimierungsvariablen (Durch ändern von Variablenzellen): $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$

Die Optimierungsvariablen sind die Maße des I-Schweißprofils: Obergurtbreite x_1 und –dicke x_2 , Steghöhe x_3 und –dicke x_4 , Untergurtbreite x_5 und –dicke x_6

• Nebenbedingungen (Unterliegt den Nebenbedingungen):

Die Nebenbedingungen sind alle geführten Tragfähigkeits-, Gebrauchstauglichkeits- und Ermüdungsnachweise

Abbildung 17 zeigt den Solver, als Zielwert (Bis:) wird die Option Min. gewählt.

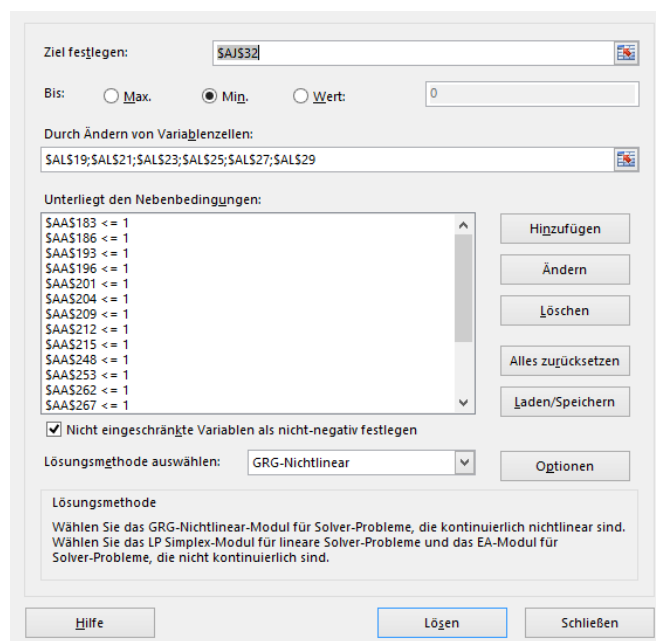


Abb. 17: Screenshot des Solvers

- Die Optimierungsvariablen lauten:

Og-Breite	296 mm
Og-Dicke	17 mm
Steghöhe	414 mm
Stegdicke	8 mm
Ug-Breite	151 mm
Ug-Dicke	15 mm

Tabelle 16: Optimierungsvariablen

→ Die Querschnittsfläche beträgt nun 106,1 cm².

- Zusammenfassung der Nachweise:

Biegespannung	97 %
Stegnormalspannung	57 %
Vergleichsspannung	85 %
Eckspannung im Obergurt	95 %
Knicken des Obergurtes	97 %
Beulnachweis	75 %
Ermüdungsnachweis	27 %
Nachweis im GZG	97 %

Tabelle 17: Nachweiszusammenfassung des optimierten Dreiblechquerschnitts

Eine Auslastung von 100 % kommt nicht vor, da die Werte auf volle mm aufgerundet wurden.

Die komplette Nachweisführung kann in den Anlagen nachvollzogen werden (siehe Anlage 2).

- Ergebnis:

Die Ausgangsquerschnittsfläche von 152,7 cm² konnte auf 106,1 cm² reduziert werden, das entspricht eine Verbesserung von 30 %. Abbildung 18 zeigt den optimierten Querschnitt im Vergleich zu dem Ausgangsquerschnitt.

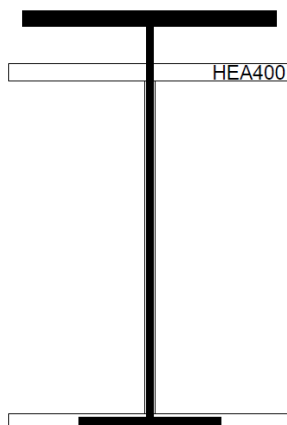


Abb. 18: Vergleich der beiden Querschnitte

7.2 Dimensionierung des Obergurtes

Um die auftretenden Horizontallasten effektiv abzutragen, wird oft ein breiter und dünner Obergurt gewählt. Das Verhältnis c/t ist dabei oft das limitierende Kriterium. Das Beispiel in Abschnitt 7.1 wird weiter geführt.

1. Variante: Die Schräglaufkraft wird um die Hälfte reduziert. $H_s = 25 \text{ kN}$

- Die optimierten Obergurtmaße: Og-Breite = 268 mm
 Og-Dicke = 15 mm

2. Variante: Die Schräglaufkraft wird verdoppelt. $H_s = 100 \text{ kN}$

- Die optimierten Obergurtmaße: Og-Breite = 331 mm
 Og-Dicke = 19 mm

→ Der kritische Nachweis (Eckspannung im Obergurt) ist jeweils mit 100% ausgelastet. Die Zusammenfassung der Nachweise können in den Anlagen 3 und 4 nachvollzogen werden.

Für den Fall dass die Beanspruchungsklasse steigt, kann auch ein gedrungener Obergurt optimal werden.

3. Variante: Die Beanspruchungsklasse steigt auf S4.

- Die optimierten Obergurtmaße: Og-Breite = 193 mm
 Og-Dicke = 36 mm

→ Der Nachweis im Stegansatz ist mit 100% ausgelastet.

7.3 Dimensionierung des Untergurtes

Für den speziellen Fall Kranbahnträger mit Horizontalverband trägt der Untergurt nur die Vertikallasten ab. Die Horizontallasten werden nur dem Obergurt und dem Horizontalverband zugeordnet. So kann der Untergurt oftmals auf die Hälfte bis 1/3 der Obergurtfläche reduziert werden. Der Biegespannungsnachweis an der Unterkante stellt dabei die Begrenzung der Reduzierung dar. Weiterhin muss der Untergurt so ausgebildet werden, dass eine stabile und konstruktive Auflagerung möglich ist.

Die Berechnungsbeispiele aus Abschnitt 7.2 verdeutlichen die Aussagen:

- 1. Variante: Og-Breite = 268 mm Ug-Breite = 184 mm
 Og-Dicke = 15 mm Ug-Dicke = 10 mm

 Og-Fläche = 4020 mm Ug-Fläche = 1840 mm

→ Die Ug-Fläche beträgt 46% der Og-Fläche

- 2. Variante: Og-Breite = 331 mm Ug-Breite = 177 mm
 Og-Dicke = 19 mm Ug-Dicke = 18 mm

 Og-Fläche = 6289 mm Ug-Fläche = 3186 mm

→ Die Ug-Fläche beträgt 51% der Og-Fläche

7.4 Dimensionierung des Steges

- Die Steghöhe kann innerhalb weiter Grenzen frei gewählt werden, ohne großen Einfluss auf das Kranbahnträgergewicht zu haben. In der Literatur wird eine Trägerhöhe von $l/15$ bis $l/8$ für schweren Kranbetrieb angegeben (l ... Spannweite).
- Grundsätzlich kann die Stegdicke so gering wie möglich ausgeführt werden, da bekanntlich der Steg kaum Biegespannungen aufnimmt. Aber auch hier gibt es Grenzen, die kritischen Nachweise lauten:
 - Vergleichsspannung an der Stegoberkante
 - Beulnachweis unter der Radlast
 - Ermüdungsnachweis am Stegansatz ab BK S₃

→ Das Beispiel aus Abschnitt 7.1 wird weiter geführt.

- 4. Variante: Die Stegdicke wird auf 6 mm reduziert:

Biegespannung	103 %
Stegnormalspannung	69 %
Vergleichsspannung	138 %
Eckspannung im Obergurt	96 %
Knicken des Obergurtes	98 %
Beulnachweis	101 %
Ermüdungsnachweis	60 %
Nachweis im GZG	101 %

Tabelle 18: Nachweiszusammenfassung der Variante 4

- 5. Variante: Die Stegdicke wird auf 10 mm aufgedickt:

Biegespannung	92 %
Stegnormalspannung	49 %
Vergleichsspannung	59 %
Eckspannung im Obergurt	94 %
Knicken des Obergurtes	95 %
Beulnachweis	62 %
Ermüdungsnachweis	15 %
Nachweis im GZG	93 %

Tabelle 19: Nachweiszusammenfassung der Variante 5

Besonders bei dem Vergleichsspannungsnachweis ist ein deutlicher Unterschied zu sehen. Für den Fall dass der Beulnachweis maßgebend wird, können Quersteifen eingesetzt werden. In diesem Beispiel sind Quersteifen nicht sinnvoll, da die Quersteifen keinen Einfluss auf den Vergleichsspannungsnachweis haben und sie die Fertigungskosten erhöhen.

- 6. Variante: Die Beanspruchungsklasse wird auf S₃ erhöht:

→ Die Radlasteinleitungsspannung am Stegansatz ist mit 199 % ausgelastet!

Die Begründung der sehr hohen Auslastung ist die zur Stegpressung zusätzliche Stegbiegung, die ab Beanspruchungsklasse S₃ berücksichtigt werden muss (siehe Abschnitt 3.1.2). Um die Stegbiegung zu reduzieren, kann der Flansch oder Steg aufgedickt werden. Der Einsatz von geeigneten Kranschienen kann auf die Stegbiegung und auch auf die Stegpressung günstigen Einfluss haben. Um das Torsionsmoment aus dem exzentrischen Radlastangriff zu reduzieren und somit die Stegbiegung zu verkleinern, muss der Schienenfuß so schmal wie möglich ausgeführt werden.

Die Stegpressung kann generell durch den Einsatz von geklemmten Schienen vom Typ A (siehe Abschnitt 2.3) minimiert werden, da sie eine höhere Bauhöhe (ab A65) als Flachstahlschienen aufweisen und sich somit die Radlasteinleitungsbreite vergrößert.

8. Auswertung

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass beim Einsatz von geschweißten I-Profilen der Materialeinsatz um ca. 1/3 eingespart werden kann (siehe Beispielrechnung aus Abschnitt 7.1). Besonders wirtschaftlich ist der Einsatz von I-Schweißprofilen bei schweren Kranbetrieb mit Horizontalverband, da die Querschnittsteile gut an die Belastungen angepasst werden können. So kann z.B. die Untergurtfläche auf die Hälfte der Obergurtfläche reduziert werden. Der Obergurt an sich kann in den meisten Fällen breit und dünn ausgeführt werden. Proberechnungen haben ergeben, dass bei großen Radlasten und Spannweiten der Einsatz von Walzprofilen zu einem erheblichen Mehrbedarf an Stahl führt. Nun stellt sich die Frage der Wirtschaftlichkeit. Zum einen kann der Materialbedarf erheblich gesenkt werden, demgegenüber stehen die höheren Fertigungskosten. Genaue Kostenkalkulationen können darüber Aufschluss geben. So müssen die Voraussetzungen und Bedingungen des Fertigungsbetriebs untersucht werden. Könnte der Maschinenpark weitere materialeinsparende Aufgaben erfüllen? Die Stützen z.B. einer Stahlhalle könnten materialsparend der Momentenlinie angepasst werden.

Die Verwendung von Horizontalverbänden (Schlingerverband) kann dann interessant werden, wenn große Spannweiten (bis zu 12m) bei gleichzeitig großen Querlasten gefordert werden, um eine ausreichende Quersteifigkeit für einen ruhigen und verschleißarmen Kranbetrieb zu gewährleisten.

Die Hauptaufgabe dieser Bachelorarbeit war die Anfertigung eines einfach zu handhabenden Excel-Programmes, mit dem die Zusammenfassung der Literaturanalyse aus dem ersten Teil gut nachvollzogen werden kann. Die Ergebnisse, besonders aus den Optimierungsrechnungen, sollten immer kritisch hinterfragt und auf Plausibilität geprüft werden.

9. Literatur

Literaturquellen

- [SEEß, 2014]** Seeßelberg C.: „Kranbahnen Bemessung und konstruktive Gestaltung nach Eurocode“, 4. vollständig überarbeitete Auflage, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014

Hilfsmittel

- [GORI, 2012]** Goris A. (Hrsg.): „Schneider Bautabellen für Ingenieure“, 20. Auflage, Siegen: Werner Verlag, 2012

Normen

- [N1991-3]** DIN EN 1991-3 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang) und Berichtigung 1 Ausgabe 08/2013
- [N1993-1-1]** DIN EN 1993-1-1 Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)
- [N1993-1-5]** DIN EN 1993-1-5 Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)
- [N1993-1-9]** DIN EN 1993-1-9 Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)
- [N1993-6]** DIN EN 1993-6 Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen; Ausgabe 12/2010 (inkl. Nationaler Anhang)

Software

RSTAB; Ing.-Software Dlubal GmbH; Tiefenbach; www.dlubal.de

EXCEL Version 2013; Microsoft Corporation

Internetquellen

Demag Cranes AG, www.demagcranes.de
Stand: 05.09.2015

10. Anlagen

Anlage 1: Berechnungslogarithmus für HEA 400

Kranbahnträger als Schweißprofilträger für "schweren Kranbetrieb"

09.11.2015

Allgemeine Angaben zu Kran und Kranbahnträger:

- Zweiträgerbrückenkran mit Schlingerverband und Hakenbetrieb
- Einfeldträger
- Räder können den Träger verlassen

Vorgaben des Bauherrn:

- Hubklasse HC2
- Beanspruchungsklasse S1
- Inspektionsintervalle 3

Angaben zum Kran: (Herstellerangaben)

- Vertikale Radlasten:

- | | | | |
|-----------|--------------|-------------|----------|
| - Achse 1 | Hublast | $Q_{h,1} =$ | 120,0 kN |
| | Eigengewicht | $Q_{c,1} =$ | 60,0 kN |
| - Achse 2 | Hublast | $Q_{h,2} =$ | 120,0 kN |
| | Eigengewicht | $Q_{c,2} =$ | 60,0 kN |

- Horizontale Radlasten

- | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------|---------------|
| - aus Schräglauf | Achse 1 | $H_s =$ | 50,0 kN |
| - aus Beschleunigen und Bremsen | | | |
| | längs zur Fahrbahn | $H_L =$ | 25,0 kN |
| | quer zur Fahrbahn | $H_T =$ | $\pm 26,0$ kN |

- Kran-Fahrgeschwindigkeit

- Hubgeschwindigkeit $v_h =$ 5,0 m/min

- Radstand $a =$ 4000,0 mm

- Kranfahrwerksystem IFF

Statisches System :

- einfeldrige Kranbahn

- Spannweite

 $l = 6000,0 \text{ mm}$

- Schlingerverband

- Verbandbreite

 $b = 1000,0 \text{ mm}$

- Verbandteilung

 $t = 2000,0 \text{ mm}$

Angaben zur Kranbahn und Kranschiene:

- Eigenlast d. Kranbahn einschl. Schlingerver. u. Laufsteg

 $g = 3,0 \text{ kN/m}$

- Kranbahn

- Werkstoff

S355

- Obergurt

Breite

300,0 mm

Stärke

19,0 mm

- Steg

Höhe

352,0 mm

Stärke

11,0 mm

- Untergurt

Breite

300,0 mm

Stärke

19,0 mm

Obere Halsnaht

Stumpfnah

 $a_o = 7,0 \text{ mm}$

Untere Halsnaht

 $a_u = 7,0 \text{ mm}$

- Kranschiene

- Schienenform

Flachstahlschiene

Werkstoff

S355

Schienenbreite

 $b_s = 60,0 \text{ mm}$

Schienendicke

50,0 mm

- Schweißnaht

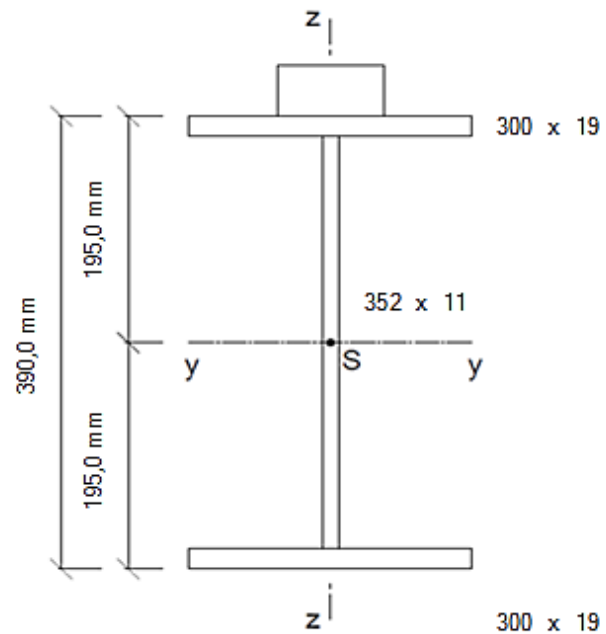
 $a_w = 7,0 \text{ mm}$

Schweißnahtform

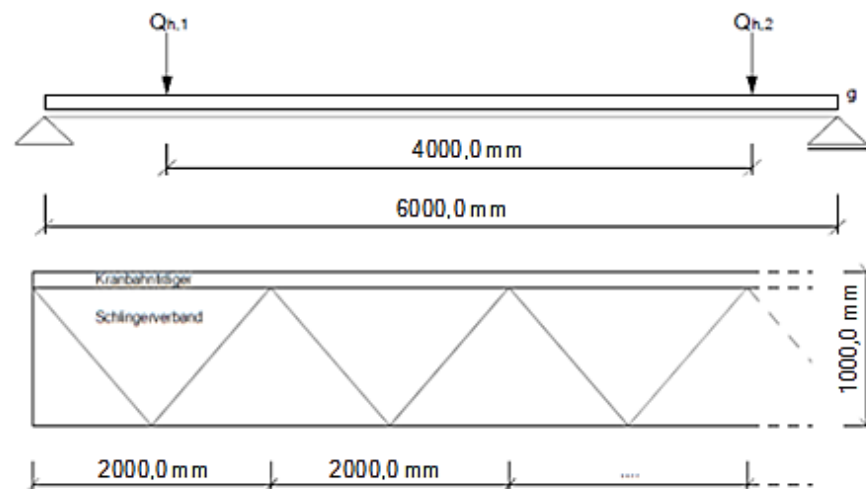
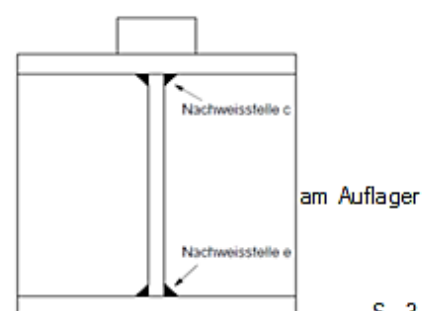
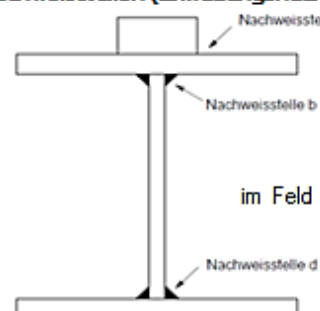
durchlaufende Naht

Querschnittswerte:

$A =$	$152,7 \text{ cm}^2$
$I_y =$	$43259,9 \text{ cm}^4$
$W_{yo} =$	$2218,5 \text{ cm}^3$
$W_{yu} =$	$2218,5 \text{ cm}^3$
$I_{z,OG} =$	$4275,0 \text{ cm}^4$
$I_{z,UG} =$	$4275,0 \text{ cm}^4$
$S_y =$	$1227,7 \text{ cm}^3$
$S_{y,OG} =$	$1057,4 \text{ cm}^3$
$S_{y,UG} =$	$1057,4 \text{ cm}^3$



Querschnittsklasse: 1

Statisches System:**Nachweisstellen (Ermüdungsnachweise):**

Zusammenfassung

1. Belastung

2. Schnittgrößen

3. Nachweise

3.1 Tragfähigkeitsnachweise

3.1.2 Grundwerkstoff

3.1.2.1 Maximales Feldmoment

- Biegespannung $\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{19,55}{35,50} = 0,55 < 1$
- max. Stegnormalspannung aus Radlasteinleitung $\frac{\sigma_{\alpha,Ed}}{\sigma_{R,d}} = \frac{15,83}{35,50} = 0,45 < 1$
- max. Vergleichsspannungen am Übergang Flansch zu Steg

Einwirkungskombination 1

Laststellung maximales Moment

$$\left(\frac{20,59}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{15,83}{35,5}\right)^2 - \frac{20,59}{35,5} \cdot \frac{15,83}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{3,17 + 3,08}{35,5}\right)^2 = 0,37 < 1$$

Laststellung Aufgarnhöhe (maximale Querkraft):

$$\left(\frac{15,83}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{3,17 + 8,39}{35,5}\right)^2 = 0,52 < 1$$

Einwirkungskombination 5

Laststellung maximales Moment

$$\left(\frac{18,82}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{14,14}{35,5}\right)^2 - \frac{18,82}{35,5} \cdot \frac{14,14}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{2,83 + 2,70}{35,5}\right)^2 = 0,30 < 1$$

Laststellung Aufgarnhöhe (maximale Querkraft):

$$\left(\frac{14,14}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{2,83 + 7,47}{35,5}\right)^2 = 0,41 < 1$$

3.1.2.2 Maximale Eckspannung im Obergurt

Einwirkungskombination 1

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{26,75}{35,50} = 0,75 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{30,66}{35,50} = 0,86 < 1$$

3.1.2.3 Maximale Querkraft

$$\frac{\tau_d}{\tau_{R,d}} = \frac{9,74}{20,50} = 0,48 < 1$$

3.1.3 Schweißnähte

Obere Halsnaht

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{20,97}{43,56} = 0,48 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 8,8 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Untere Halsnaht

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{11,41}{43,56} = 0,26 < 1$$

Schienenschweißnaht

Einwirkungskombination 1

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{24,88}{43,56} = 0,57 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 13,1 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{24,16}{43,56} = 0,55 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 13,3 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

3.2 Stabilitätsnachweise

3.2.1 Biegedrillknicken - Knicken des Obergurtes

Einwirkungskombination 1

$$\frac{1255,7}{0,94 \cdot 64,7 \cdot 35,5} + \frac{0,92 \cdot 1755,0}{285,0 \cdot 35,5} = 0,82 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{1132,9}{0,94 \cdot 64,7 \cdot 35,5} + \frac{0,92 \cdot 3375,0}{285,0 \cdot 35,5} = 0,92 < 1$$

3.2.2 Beulnachweise

3.2.2.1 Plattenbeulen bei Längsspannungen

Einwirkungskombination 1

$$\eta_1 = \frac{52,7}{35,5 \cdot 64,7} + \frac{33,8}{35,5 \cdot 152,7} + \frac{433,8 \cdot 100}{35,5 \cdot 2218,5} = 0,64 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\eta_1 = \frac{101,3}{35,5 \cdot 64,7} + \frac{382,7 \cdot 100}{35,5 \cdot 2218,5} = 0,58 < 1$$

3.2.2.2 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast (EK1)

$$\eta_2 = \frac{\max F_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w} = \frac{272,2}{35,5 \cdot 32,3 \cdot 1,1} = 0,24 < 1$$

3.2.2.3 Interaktion

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 = 0,24 + 0,8 \cdot 0,64 = 0,75 < 1,4$$

3.2.2.4 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{h_w \cdot t_w}{b_f \cdot t_f}} ; \quad = 32,0 < 268,2$$

3.3 Ermüdungsnachweise

3.3.1 Nachweis Oberkante Flansch, Schienenschweißnaht (Nachweisstelle a)

Oberkante Flansch

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,24}{10,00 \cdot 1,15} = 0,28 < 1$$

Schienenschweißnaht

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,64}{3,60 \cdot 1,15} = 0,88 < 1$$

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,31}{8,00 \cdot 1,15} = 0,25 < 1$$

3.3.2 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle b)

3.3.2.1 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{x,E,2}}{\Delta \sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,76}{11,20 \cdot 1,15} = 0,21 < 1$$

3.3.2.2 Radlasteinleitungsspannung σ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{x,E,2}}{\Delta \sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,51}{7,10 \cdot 1,15} = 0,43 < 1$$

3.3.2.3 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{4,39}{1,15} = 0,48 < 1$$

3.3.2.4 Interaktion

$$0,21^3 + 0,43^3 + 0,48^5 = 0,11 < 1$$

3.3.3 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle c)

3.3.3.1 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{4,46}{1,15} = 0,48 < 1$$

3.3.3.2 Interaktion

$$0,43^3 + 0,48^5 = 0,11 < 1$$

3.3.4 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle b)

3.3.4.1 Radlasteinleitungsspannung σ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{zc}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{zE,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{7,10} \cdot \frac{2,76}{1,15} = 0,34 < 1$$

3.3.4.2 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{3,88}{1,15} = 0,42 < 1$$

3.3.4.3 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{xc}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{xE,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{11,20} \cdot \frac{2,92}{1,15} = 0,23 < 1$$

3.3.5 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle c)

• Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{4,00}{1,15} = 0,43 < 1$$

3.3.6 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle d)

3.3.6.1 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{2,13}{1,15} = 0,23 < 1$$

3.3.6.2 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{xc}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{xE,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{11,20} \cdot \frac{2,92}{1,15} = 0,23 < 1$$

3.3.7 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle e)

• Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{2,47}{1,15} = 0,27 < 1$$

3.4. Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

3.4.1 Vertikale Durchbiegung

$$\delta_{z,ges.} = 0,947 \text{ cm} < 1,500 = 1,200 \text{ cm}$$

3.4.2 Stegblechatmen und Untergurtschwingungen

• Stegblechatmen

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{332,2}{11,0} = 30,2 < 120$$

• Untergurtschwingungen

$$\frac{l}{i_{z,UG}} = \frac{600}{8,7} = 69 < 250$$

1. Belastung

1.1 Schwingbeiwerte nach (DIN EN 1991-3 Tab. 2.1, 2.4, 2.6, 2.10)

φ_1 : $0,9 < \varphi_1 < 1,1$; Schwingungsanregung infolge Anheben der Hublast

$$\varphi_1 = 1,1$$

φ_2 : $\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_h$; Dynamische Wirkungen beim Anheben der Hublast vom Boden

$$v_h = 5,0 \frac{m}{min} = \frac{5,0}{60} \cdot \frac{m}{s}$$

$$\beta_2 = 0,34 \quad \text{Hubklasse HC2}$$

$$\varphi_{2,min} = 1,1 \quad \text{Hubklasse HC2}$$

$$\varphi_2 = 1,1 + 0,34 \cdot 5,0 / 60$$

$$\varphi_2 = 1,13$$

φ_4 : $\varphi_4 = 1,0$; Dynamische Wirkung hervorgerufen durch Fahren auf Schienen

φ_5 : $\varphi_5 = 1,5$; Dynamische Wirkungen verursacht durch Antriebskräfte

$\varphi_{fat,1}$: $\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2}$; Schadensäquivalenter dynamischer Vergrößerungsbeiwert

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + 1,1}{2} = 1,05$$

$\varphi_{fat,2}$: $\varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2} = \frac{1 + 1,13}{2} = 1,07$

1.2 Eigengewicht Kranbahn

Eigenlast des Kranbahnträgers einschließlich Schlingerverband und Laufsteg

$$g = 3,0 \text{ kN/m}$$

1.3 Verkehrslasten von Kranaufrädern (nach Herstellerangaben)

1.3.1 Vertikale Lasten aus Kranbetrieb

Achse 1: $Q_{h,1} = 120,0 \text{ kN}$ (inf. Hublast)

$Q_{c,1} = 60,0 \text{ kN}$ (inf. Eigengewicht)

Achse 2: $Q_{h,2} = 120,0 \text{ kN}$ (inf. Hublast)

$Q_{c,2} = 60,0 \text{ kN}$ (inf. Eigengewicht)

1.3.2 Horizontale Kranlasten

1.3.2.1 Horizontale Kranlasten aus Anfahren und Bremsen

längs zur Fahrbahn $H_L = 25,0 \text{ kN}$

quer zur Fahrbahn $H_T = \pm 26,0 \text{ kN}$

1.3.2.2 Horizontale Kranlasten aus Schräglauf

Vorderachse $H_{s1} = 50,0 \text{ kN}$

1.3.3 Lastgruppenbildung (DIN EN 1991-3, Tab.2.2)

1.3.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit (DIN EN 1991-3, Tab.2.2)

Lastgruppe 1:

Vertikale Radlasten:

$$F_1 = \varphi_1 \cdot Q_{c,1} + \varphi_2 \cdot Q_{h,1} = 1,1 \cdot 60,0 + 1,13 \cdot 120,0 = 201,6 \text{ kN}$$

$$F_2 = \varphi_1 \cdot Q_{c,2} + \varphi_2 \cdot Q_{h,2} = 1,1 \cdot 60,0 + 1,13 \cdot 120,0 = 201,6 \text{ kN}$$

Horizontalkraft längs der Fahrbahn:

$$H_L = H_L = 25,0 \text{ kN}$$

Horizontalkraft quer der Fahrbahn:

$$H_T = H_T = \pm 26,0 \text{ kN}$$

Lastgruppe 2:

- Nur nötig bei Verwendung von Greifern und Magneten → kann entfallen!

Lastgruppe 3:

- LG1 maßgebend → kann entfallen!

Lastgruppe 4:

- LG1 maßgebend → kann entfallen!

Lastgruppe 5:

Vertikale Radlasten:

$$F_1 = \varphi_4 \cdot Q_{c,1} + \varphi_4 \cdot Q_{h,1} = 1,0 \cdot 60,0 + 1,0 \cdot 120,0 = 180,0 \text{ kN}$$

$$F_2 = \varphi_4 \cdot Q_{c,2} + \varphi_4 \cdot Q_{h,2} = 1,0 \cdot 60,0 + 1,0 \cdot 120,0 = 180,0 \text{ kN}$$

Horizontalkraft aus Schräglauf:

$$H_1 = 1,0 \cdot H_{s1} = 1,0 \cdot 50,0 = 50,0 \text{ kN}$$

Lastgruppe 6:

- LG5 maßgebend → kann entfallen!

Lastgruppe 7:

- LG1 maßgebend → kann entfallen!

Lastgruppe 8:

- Es werden keine Prüfversuche durchgeführt. → kann entfallen!

Lastgruppe 9:

- Pufferkraft nicht bemessungsrelevant für Kranbahnträger → kann entfallen!

Lastgruppe 10:

- Kippkraft nicht bemessungsrelevant für Kranbahnträger → kann entfallen!

1.3.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN EN 1991-6 NA, Tab. NA1)

Lastgruppe 11: (für Verformungsberechnung – Vertikal)

Vertikale Radlasten:

$$F_1 = 1 \cdot Q_{c,1} + 1 \cdot Q_{h,1} = 1,0 \cdot 60,0 + 1,0 \cdot 120,0 = 180,0 \text{ kN}$$

$$F_2 = 1 \cdot Q_{c,2} + 1 \cdot Q_{h,2} = 1,0 \cdot 60,0 + 1,0 \cdot 120,0 = 180,0 \text{ kN}$$

Lastgruppe 12/13: (für Verformungsberechnung – Horizontal)

Der Verformungsnachweis (horizontal) wird nicht gef

1.3.3.3 Grenzzustand der Ermüdung (DIN EN 1991-6, 9.3)**Lastgruppe 14:**

Vertikale Radlasten:

$$F_1 = \varphi_{fat,1} \cdot Q_{c,1} + \varphi_{fat,2} \cdot Q_{h,1} = 1,05 \cdot 60,0 + 1,07 \cdot 120,0 \\ = 191,4 \text{ kN}$$

$$F_2 = \varphi_{fat,1} \cdot Q_{c,2} + \varphi_{fat,2} \cdot Q_{h,2} = 1,05 \cdot 60,0 + 1,07 \cdot 120,0 \\ = 191,4 \text{ kN}$$

2. Schnittkräfte**2.1 Schnittkräfte infolge der einzelnen Lasten****2.1.1 Verkehrslasten von Kranlaufträdern****Lastgruppe 1:**

$$\text{Radlasten: } F_1 = 201,6 \text{ kN} \quad ; \quad F_2 = 201,6 \text{ kN}$$

• **Culmannsche Laststellung**

$$\sum F = 201,6 + 201,6 = 403,2 \text{ kN}$$

Abstand der Resultierenden $\sum F$ von der maximalen Radlast F_{\max} :

$$c = a \cdot \frac{F_{\min}}{\sum F} = 4 \cdot \frac{201,6}{403,2} = 2,00 \text{ m}$$

Culmannsche Laststellung:

$$x = \frac{l}{2} - \frac{c}{2} = \frac{6,0}{2} - \frac{2,00}{2} = 2,00 \text{ m}$$

Charakteristisches Moment $M_{y,k,1}$ aus Radlasten:

$$A_v = \frac{l - x - c}{l} \cdot \sum F = \frac{6,0 - 2,00 - 2,00}{6,0} \cdot 403,2 = 134,4 \text{ kN}$$

$$M_{y,k,1} = A_v \cdot x = 134,4 \text{ kN} \cdot 2,00 \text{ m} = 268,8 \text{ kNm}$$

• **Laststellung mit F_{\max} in Trägemitte**

$$M_{y,k,2} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} = \frac{201,6 \cdot 6,0}{4} = 302,4 \text{ kNm}$$

• **Maximales Biegemoment $\max M_{y,k}$:**

$$\max M_{y,k} = \max (M_{y,k,1} ; M_{y,k,2}) = 302,4 \text{ kNm}$$

• **Zugehörige Querkraft $V_{z,zug M,k}$**

$$V_{z,zug M,k,1} = A_v = 134,4 \text{ kN}$$

$$V_{z,zug M,k,2} = \frac{F_{\max}}{2} = \frac{201,6}{2} = 100,8 \text{ kN}$$

$$V_{z,zug M,k} = 100,8 \text{ kN}$$

• **Maximale Querkraft $\max V_{z,k}$:**

$$\max V_{z,k} = F_{\max} + \frac{l - a}{l} \cdot F_{\min} = 201,6 + \frac{6,0 - 4,00}{6,0} \cdot 201,6 \\ = 268,8 \text{ kN}$$

Lastgruppe 5,11 und 12:

Radlasten: $F_1 = 180,0 \text{ kN}$; $F_2 = 180,0 \text{ kN}$

- **Culmannsche Laststellung**

$$\sum F = 180,0 + 180,0 = 360,0 \text{ kN}$$

Abstand der Resultierenden $\sum F$ von der maximalen Radlast F_{\max} :

$$c = a \cdot \frac{F_{\min}}{\sum F} = 4 \cdot \frac{180,0}{360,0} = 2,00 \text{ m}$$

Culmannsche Laststellung:

$$x = \frac{l}{2} - \frac{c}{2} = \frac{6,0}{2} - \frac{2,00}{2} = 2,00 \text{ m}$$

Charakteristisches Moment $M_{y,k,1}$ aus Radlasten:

$$A_v = \frac{l - x - c}{l} \cdot \sum F = \frac{6,0 - 2,00 - 2,00}{6,0} \cdot 360,0 = 120,0 \text{ kN}$$

$$M_{y,k,1} = A_v \cdot x = 120,0 \text{ kN} \cdot 2,00 \text{ m} = 240,0 \text{ kNm}$$

- **Laststellung mit F_{\max} in Trägemitte**

$$M_{y,k,2} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} = \frac{180,0 \cdot 6,0}{4} = 270,0 \text{ kNm}$$

- **Maximales Biegemoment $\max M_{y,k}$:**

$$\max M_{y,k} = \max (M_{y,k,1} ; M_{y,k,2}) = \underline{270,0 \text{ kNm}}$$

- **Zugehörige Querkraft $V_{z,\text{zug } M,k}$**

$$V_{z,\text{zug } M,k,1} = A_v = 120,0 \text{ kN}$$

$$V_{z,\text{zug } M,k,2} = \frac{F_{\max}}{2} = \frac{180,0}{2} = 90,0 \text{ kN}$$

$$V_{z,\text{zug } M,k} = 90,0 \text{ kN}$$

- **Maximale Querkraft $\max V_{z,k}$:**

$$\begin{aligned} \max V_{z,k} &= F_{\max} + \frac{l - a}{l} \cdot F_{\min} = 180,0 + \frac{6,0 - 4,00}{6,0} \cdot 180,0 \\ &= 240,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

Lastgruppe 14:

Radlasten: $F_1 = 191,4 \text{ kN}$; $F_2 = 191,4 \text{ kN}$

- **Culmannsche Laststellung**

$$\sum F = 191,4 + 191,4 = 382,8 \text{ kN}$$

Abstand der Resultierenden $\sum F$ von der maximalen Radlast F_{\max} :

$$c = a \cdot \frac{F_{\min}}{\sum F} = 4 \cdot \frac{191,4}{382,8} = 2,00 \text{ m}$$

Culmannsche Laststellung:

$$x = \frac{l}{2} - \frac{c}{2} = \frac{6,0}{2} - \frac{2,00}{2} = 2,00 \text{ m}$$

Charakteristisches Moment $M_{y,k,1}$ aus Radlasten:

$$A_v = \frac{l - x - c}{l} \cdot \Sigma F = \frac{6,0 - 2,00 - 2,00}{6,0} \cdot 382,8 = 127,6 \text{ kN}$$

$$M_{y,k,1} = A_v \cdot x = 127,6 \text{ kN} \cdot 2,00 \text{ m} = 255,2 \text{ kNm}$$

- Laststellung mit F_{\max} in Trägemitte

$$M_{y,k,2} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} = \frac{191,4 \cdot 6,0}{4} = 287,1 \text{ kNm}$$

- Maximales Biegemoment $\max M_{y,k}$:

$$\max M_{y,k} = \max (M_{y,k,1} ; M_{y,k,2}) = 287,1 \text{ kNm}$$

- Zugehörige Querkraft $V_{z,zug M,k}$

$$V_{z,zug M,k,1,r} =$$

$$V_{z,zug M,k,1,l} = \text{entfällt}$$

$$=$$

$$V_{z,zug M,k,2} = \frac{F_{\max}}{2} = \frac{191,4}{2} = 95,7 \text{ kN}$$

$$V_{z,zug M,k} = 95,7 \text{ kN}$$

- Maximale Querkraft $\max V_{z,k}$:

$$\begin{aligned} \max V_{z,k} &= F_{\max} + \frac{l - a}{l} \cdot F_{\min} = 191,4 + \frac{6,0 - 4,00}{6,0} \cdot 191,4 \\ &= 255,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

2.1.2 Eigengewicht Kranbahnträger

$$g = 3,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\begin{aligned} M_{y,k} &= \frac{g \cdot l}{2} \cdot x - g \cdot \frac{x^2}{2} = \frac{3,0 \cdot 6,0}{2} \cdot 3,00 - 3,0 \cdot \frac{3,00^2}{2} \\ &= 13,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{z,k} &= g \cdot \left(\frac{l}{2} - x \right) = 3,0 \cdot \left(\frac{6,0}{2} - 3,00 \right) \\ &= 0,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\max V_{z,k} = \frac{g \cdot l}{2} = \frac{3,0 \cdot 6,0}{2} = 9,0 \text{ kN}$$

2.1.3 Brems- bzw. Anfahrkraft H_L und H_r (Tragwirkungssplitting)

Lastgruppe 1:

- $H_L = 25,0 \text{ kN}$

$$A = B = \max V_{z,k} = \frac{H_L \cdot h}{l} = \frac{25,0 \cdot 440,0}{6000} = 1,8 \text{ kN}$$

$$\max M_{y,k} = 1,8 \cdot 3,0 \text{ m} = 5,4 \text{ kNm}$$

$$N_L = \pm 25,0 \text{ kN}$$

- $H_T = \pm 26,0 \text{ kN}$

Gurtnormalkraft $N_{H,Og}$ des Schlingerverbandes (vereinfacht)

$$\begin{aligned}\sum M_A = 0 &= 3,0 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ kN} - 0,0 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ kN} - B \cdot 6,0 \text{ m} \\ B &= 13,0 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_1 = 0 &= - 0,0 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ kN} + 3,0 \text{ m} \cdot 13,0 \text{ kN} - 1,0 \text{ m} \cdot N_{H,Og} \\ N_{H,Og} &= \pm 39,0 \text{ kN}\end{aligned}$$

Lokale Biegung $M_{z,k,lokal}$ des Obergurtes (vereinfacht)

Stelle $\max M_{y,k}$ bei: 3,00 m

Verbandteilung 2,00 m

Auflager davor bei: 2,0 m

Auflager danach bei: 4,0 m

$$\text{Faktor } M_z: \frac{(3,00 \text{ m} - 2,0 \text{ m}) \cdot (4,0 \text{ m} - 3,00 \text{ m})}{(4,0 \text{ m} - 2,00 \text{ m})} = 0,50 \text{ m}$$

$$M_{z,k,lokal} = \pm 26,0 \text{ kN} \cdot 0,50 \text{ m} = \pm 13,0 \text{ kNm}$$

2.1.4 Seitenkraft H_s (Tragwirkungssplitting)

Lastgruppe 5 und 12:

- $H_s = 50,0 \text{ kN}$

Gurtnormalkraft $N_{H,Og}$ des Schlingerverbandes (vereinfacht)

$$\begin{aligned}\sum M_A = 0 &= 3,0 \text{ m} \cdot 50,0 \text{ kN} - B \cdot 6,0 \text{ m} \\ B &= 25,0 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_1 = 0 &= 3,0 \text{ m} \cdot 25,0 \text{ kN} + 1,0 \text{ m} \cdot N_{H,Og} \\ N_{H,Og} &= 75,0 \text{ kN}\end{aligned}$$

Lokale Biegung $M_{z,k,lokal}$ des Obergurtes (vereinfacht)

Stelle $\max M_{y,k}$ bei: 3,00 m

Verbandteilung 2,00 m

Auflager davor bei: 2,0 m

Auflager danach bei: 4,0 m

$$\text{Faktor } M_z: \frac{(3,00 \text{ m} - 2,0 \text{ m}) \cdot (4,0 \text{ m} - 3,00 \text{ m})}{(4,0 \text{ m} - 2,00 \text{ m})} = 0,50 \text{ m}$$

$$M_{z,k,lokal} = 50,0 \text{ kN} \cdot 0,50 \text{ m} = 25,0 \text{ kNm}$$

2.2 Schnittgrößen für Einwirkungskombinationen

2.2.1 Schnittgrößen für Einwirkungskombination 1

(1,35 · Eigengewicht Kranbahnträger + 1,35 · Lastgruppe 1)

Laststellung Maximales Moment:

$$\begin{aligned} M_{y,d} &= 1,35 \cdot 13,5 + 1,35 \cdot (302,4 + 5,4) &= 433,8 \text{ kNm} \\ M_{z,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 13,0 &= 17,6 \text{ kNm} \\ V_{z,zug M,d} &= 1,35 \cdot 0,0 + 1,35 \cdot (100,8 + 1,8) &= 138,5 \text{ kN} \\ N_{H,Og,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 39,0 &= 52,7 \text{ kN} \\ N_{L,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 25,0 &= 33,8 \text{ kN} \\ F_{z,d} &= 1,35 \cdot 201,6 &= 272,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Laststellung Maximale Querkraft:

$$V_{z,d} = 1,35 \cdot 9,0 + 1,35 \cdot (268,8 + 1,8) = 377,5 \text{ kN}$$

2.2.2 Schnittgrößen für Einwirkungskombination 5

(1,35 · Eigengewicht Kranbahnträger + 1,35 · Lastgruppe 5)

Laststellung Maximales Moment:

$$\begin{aligned} M_{y,d} &= 1,35 \cdot 13,5 + 1,35 \cdot 270,0 &= 382,7 \text{ kNm} \\ M_{z,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 25,0 &= 33,8 \text{ kNm} \\ V_{z,zug M,d} &= 1,35 \cdot 0,0 + 1,35 \cdot 90,0 &= 121,5 \text{ kN} \\ N_{H,Og,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 75,0 &= 101,3 \text{ kN} \\ F_{z,d} &= 1,35 \cdot 180,0 &= 243,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

Laststellung Maximale Querkraft:

$$V_{z,d} = 1,35 \cdot 9,0 + 1,35 \cdot 240,0 = 336,2 \text{ kN}$$

2.2.3 Schnittgrößen für Einwirkungskombination 14

(1,0 · Eigengewicht Kranbahnträger + 1,0 · Lastgruppe 14)

Laststellung Minimales Moment:

$$M_{y,d} = 1,0 \cdot 13,5 + 1,0 \cdot 0,0 = 13,5 \text{ kNm}$$

Laststellung Maximales Moment:

$$\begin{aligned} M_{y,d} &= 1,0 \cdot 13,5 + 1,0 \cdot 287,1 &= 300,6 \text{ kNm} \\ F_{z,d} &= 1,0 \cdot 191,4 &= 191,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Laststellung beide Räder links der Stelle x:

$$V_{z,zug M,d,l} = 1,0 \cdot 0,0 - 1,0 \cdot 95,7 = -95,7 \text{ kN}$$

Laststellung beide Räder rechts der Stelle x:

$$V_{z,zug M,d,r} = 1,0 \cdot 0,0 + 1,0 \cdot 95,7 = 95,7 \text{ kN}$$

Laststellung Maximale Querkraft:

$$V_{z,d} = 1,0 \cdot 0,0 + 1,0 \cdot 255,2 = 255,2 \text{ kN}$$

3. Nachweise

3.1 Tragfähigkeitsnachweise

3.1.1 Bestimmung der Querschnittsklasse

Nach DIN EN 1993-1-1, Tab. 5.2

$$\varepsilon = 0,81$$

Oberquert: einseitig gestützter Querschnittsteil unter konstanter Druckbeanspruchung

$$\frac{c}{t} = \frac{(300 - 11) / 2 - 7 \cdot \sqrt{2}}{19} = 7,08 < 9 \cdot \varepsilon = 7,29$$

→ Querschnittsklasse 1

Steg: beidseitig gestützter Querschnittsteil unter Biegebeanspruchung

$$\frac{c}{t} = \frac{352 - 7 \cdot \sqrt{2} - 7 \cdot \sqrt{2}}{11} = 30,20 < 72 \cdot \varepsilon = 58,32$$

→ Querschnittsklasse 1

3.1.2 Grundwerkstoff

Beanspruchbarkeit:

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} = \frac{355}{1,0} = 355 \text{ N/mm}^2 ; \tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{355}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 205 \text{ N/mm}^2$$

3.1.2.1 Maximales Feldmoment

- Biegespannung: $\max \sigma_x$ tritt am unteren Rand in Einwirkungskombination 1 auf

$$\sigma_{x,d} = \frac{\max M_{y,d}}{W_{yu}} = \frac{433,8 \cdot 100}{2218} = 19,55 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{19,55}{35,50} = 0,55 < 1$$

- max. Stegnormalspannung aus Radlasteinleitung tritt in Einwirkungskombination 1 auf (Abnutzung der Kranschiene beträgt 25%)

$$b_{eff} = b_f + h_r + t_f \leq b_f = 60 + 37,5 + 19 = 117 \text{ mm} < 300 \text{ mm}$$

$$I_{t,eff} = \frac{b_{eff} \cdot t_f^3}{12} = \frac{117 \cdot 19^3}{12} = 6,7 \text{ cm}^4 \quad \text{Trägheitsmoment des Flanschteils mit der effektiven Breite } b_{eff}$$

$$I_r = \text{entfällt cm}^4 \quad \text{Trägheitsmoment der Schiene um ihre horizontalen Schwerlinie}$$

$$I_f = 122,3 \text{ cm}^4 \quad \text{Trägheitsmoment des zusammenge. Querschnitts Schiene/Flans}$$

$$t_w = 1,1 \text{ cm}$$

$$I_{eff} = 3,25 \cdot \left(\frac{I_f}{t_w} \right)^{1/3} = 15,6 \text{ cm}$$

$$\sigma_{\omega,d} = \frac{\max F_{z,d}}{t_w \cdot I_{eff}} = \frac{272,2}{1,1 \cdot 15,6} = 15,83 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{\omega,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{15,83}{35,50} = 0,45 < 1$$

- max. Vergleichsspannungen am Übergang Flansch zu Steg:

Einwirkungskombination 1

$$\sigma_{\omega,d} = 15,83 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\text{oxz,d}} = 0,2 \cdot \sigma_{\text{oxz,Ed}} = 3,17 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{\text{OG}} = \text{Querschnittsfläche des Obergurtes } A_{\text{OG}} + 1/5 \text{ Steg} = 64,7 \text{ cm}^2$$

Laststellung maximales Moment:

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{yo}} + \frac{N_{H,OG,d}}{A_{\text{OG}}} + \frac{N_{L,d}}{A} = \frac{433,8 \cdot 100}{2218} + \frac{52,7}{64,7} + \frac{33,8}{152,7} = 20,59 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{\text{zzug M,d}} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s} = \frac{138,5 \cdot 1057,4}{43259,9 \cdot 1,1} = 3,08 \text{ kN/cm}^2$$

Laststellung Auflagernähe (maximale Querkraft):

$$\sigma_{x,d} \cong 0,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{z,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s} = \frac{377,5 \cdot 1057,4}{43259,9 \cdot 1,1} = 8,39 \text{ kN/cm}^2$$

→ Nachweis:

Laststellung maximales Moment:

$$\left(\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{oxz,d}}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 - \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \cdot \frac{\sigma_{\text{oxz,d}}}{\sigma_{R,d}} + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{\text{oxz,d}} + \tau_{xz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{20,59}{35,5} \right)^2 + \left(\frac{15,83}{35,5} \right)^2 - \frac{20,59}{35,5} \cdot \frac{15,83}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{3,17 + 3,08}{35,5} \right)^2 = 0,37 < 1$$

Laststellung Auflagernähe:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{oxz,d}}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{\text{oxz,d}} + \tau_{xz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{15,83}{35,5} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{3,17 + 8,39}{35,5} \right)^2 = 0,52 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\sigma_{\text{ox,d}} = \frac{\max F_{z,d}}{t_w \cdot l_{\text{eff}}} = \frac{243,0}{1,1 \cdot 15,6} = 14,14 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\text{oxz,d}} = 0,2 \cdot \sigma_{\text{ox,Ed}} = 2,83 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{\text{OG}} = \text{Querschnittsfläche des Obergurtes } A_{\text{OG}} + 1/5 \text{ Steg} = 64,7 \text{ cm}^2$$

Laststellung maximales Moment:

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{yo}} + \frac{N_{H,OG,d}}{A_{\text{OG}}} = \frac{382,7 \cdot 100}{2218} + \frac{101,3}{64,7} = 18,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{\text{zzug M,d}} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s} = \frac{121,5 \cdot 1057,4}{43259,9 \cdot 1,1} = 2,70 \text{ kN/cm}^2$$

Laststellung Auflagernähe (maximale Querkraft):

$$\sigma_{x,d} \cong 0,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{z,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s} = \frac{336,2 \cdot 1057,4}{43259,9 \cdot 1,1} = 7,47 \text{ kN/cm}^2$$

→ Nachweis:

Laststellung maximales Moment:

$$\left(\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{oxz,d}}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 - \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \cdot \frac{\sigma_{\text{oxz,d}}}{\sigma_{R,d}} + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{\text{oxz,d}} + \tau_{xz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{18,82}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{14,14}{35,5}\right)^2 - \frac{18,82}{35,5} \cdot \frac{14,14}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{2,83 + 2,70}{35,5}\right)^2 = 0,30 < 1$$

Laststellung Auflagernähe:

$$\left(\frac{\sigma_{xz,d}}{\sigma_{R,d}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{xzd} + \tau_{xzd}}{\sigma_{R,d}}\right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{14,14}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{2,83 + 7,47}{35,5}\right)^2 = 0,41 < 1$$

3.1.2.2 Maximale Eckspannung im Obergurt

Einwirkungskombination 1

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{yo}} + \frac{M_{z,d}}{I_{z,OG}} \cdot y + \frac{N_{H,OG,d}}{A_{DG}} + \frac{N_{L,d}}{A}$$

$$\sigma_{x,d} = \frac{433,8 \cdot 100}{2218} + \frac{17,6 \cdot 100}{4275,0} \cdot 15 + \frac{52,7}{64,7} + \frac{33,8}{152,7} = 26,75 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{26,75}{35,50} = 0,75 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{yo}} + \frac{M_{z,d}}{I_{z,OG}} \cdot y + \frac{N_{H,OG,d}}{A_{DG}}$$

$$\sigma_{x,d} = \frac{382,7 \cdot 100}{2218} + \frac{33,8 \cdot 100}{4275,0} \cdot 15 + \frac{101,3}{64,7} = 30,66 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{30,66}{35,50} = 0,86 < 1$$

3.1.2.3 Maximale Querkraft

- max. Steg Schubspannung tritt in EK1 auf:

$$\tau_d = \frac{\max V_{z,d}}{I_y} \cdot \frac{S_y}{s} = \frac{377,5}{43259,9} \cdot \frac{1227,7}{1,1} = 9,74 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\tau_d}{\tau_{R,d}} = \frac{9,74}{20,50} = 0,48 < 1$$

3.1.3 Schweißnähte

Obere Halsnaht

Richtungsbezogenes Verfahren

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\max F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_o \cdot l_{eff}} = \frac{272,2}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 15,6} = 8,80 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{\max V_{z,d}}{I_y} \cdot \frac{S_{y,OG}}{2 \cdot a_o} = \frac{377,5}{43259,9} \cdot \frac{1057,4}{2 \cdot 0,7} = 6,59 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{v,w,d} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\parallel}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} = 20,97 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{w,R,d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{49}{0,9 \cdot 1,25} = 43,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{20,97}{43,56} = 0,48 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 8,8 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Untere Halsnaht

$$\tau_{\perp} = \frac{\max V_{z,d} \cdot S_{y,UG}}{I_y \cdot 2 \cdot a_u} = \frac{377,5}{43259,9} \cdot \frac{1057,4}{2 \cdot 0,7} = 6,59 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{v,w,d} = \sqrt{3} \cdot \tau_{\perp} = 11,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{11,41}{43,56} = 0,26 < 1$$

Schienenschweißnaht

- Lastausbreitungslänge an der Schienenschweißnaht

$$l = l_{\text{eff}} - 2 \cdot t_f = 15,6 - 2 \cdot 1,9 = 11,8 \text{ cm}$$

$$l_w = 9,0 \text{ cm}$$

- Durchlaufende Schweißnaht

Einwirkungskombination 1

$$\begin{aligned} \max \tau_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} + \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ &= \frac{272,2}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 11,8} + \frac{35,1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 11,8} = 13,12 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{zu } \sigma_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} - \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ &= \frac{272,2}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 11,8} - \frac{35,1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 11,8} = 10,12 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\tau_{\parallel} = 0 \quad \text{da nicht mittragende Schiene}$$

$$\sigma_{v,w,d} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\parallel}^2} = 24,88 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{w,R,d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{49}{0,9 \cdot 1,25} = 43,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{24,88}{43,56} = 0,57 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 13,1 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Einwirkungskombination 5

$$\begin{aligned} \max \tau_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} + \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ &= \frac{243,0}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 11,8} + \frac{67,5}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 11,8} = 13,26 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{zu } \sigma_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} - \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ &= \frac{243,0}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 11,8} - \frac{67,5}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 11,8} = 7,49 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\tau_{\parallel} = 0 \quad \text{da nicht mittragende Schiene}$$

$$\sigma_{v,w,d} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\parallel}^2} = 24,16 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{w,R,d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{49}{0,9 \cdot 1,25} = 43,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{24,16}{43,56} = 0,55 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 13,3 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

3.2 Stabilitätsnachweise

3.2.1 Biegedrillknicken - Knicken des Obergurtes

$$A_{DG} = \text{Querschnittsfläche des Obergurtes } A_{OG} + 1,5 \text{ Steg} = 64,7 \text{ cm}^2$$

$$i_{z,OG} = \sqrt{\frac{I_{z,OG}}{A_{DG}}} = \sqrt{\frac{4275,0}{64,7}} = 8,1$$

$$W_{OG,z} = \frac{I_{z,OG}}{b/2} = \frac{4275,0}{15,0} = 285,0 \text{ cm}^3$$

- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstab

$$N_{Og,d} = \frac{M_{y,d}}{h_{steg} + 0,5 \cdot (t_{f,u} + t_{f,o})} + N_{H,Og,d} + N_{L,d}$$

Einwirkungskombination 1

$$N_{Og,d} = \frac{433,8}{35,2 + 0,5 \cdot (1,9 + 1,9)} \cdot 100 + 52,7 + 33,8 = 1255,7 \text{ kN}$$

$$M_{z,d} = 17,6 \text{ kNm}$$

Einwirkungskombination 5

$$N_{Og,d} = \frac{382,7}{35,2 + 0,5 \cdot (1,9 + 1,9)} \cdot 100 + 101,3 = 1132,9 \text{ kN}$$

$$M_{z,d} = 33,8 \text{ kNm}$$

- Knicklänge des Druckstab $L_{cr} = 1,0 \cdot 2,0 \text{ m} = 2,0 \text{ m}$

$$\lambda_{11} = 76,4 \quad (\text{Bezugsschlankheitsgrad})$$

$$\lambda_{z,z} = \frac{L_{cr}}{i_{z,OG} \cdot \lambda_{11}} = \frac{200,0}{8,1 \cdot 76,4} = 0,32$$

- Knicklinie nach [3-1-1/Tab.6.2]

Schweißprofil; $t_f < 40 \text{ mm}$; ausweichen senkrecht zur Achse $z \rightarrow$ Knicklinie **c**

- Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_{z,z} - 0,2)] + \lambda_{z,z}^2 \\ &= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,32 - 0,2)] + 0,32^2 = 0,58 \end{aligned}$$

$$X_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{z,z}^2}} = \frac{1}{0,58 + \sqrt{0,58^2 - 0,32^2}} = 0,94 < 1,00$$

- Für die Querschnittsklassen 1 und 2 gilt nach [3-1-1/Anhang]

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot [1 + (2 \cdot \lambda_{z,z} - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,d} \cdot \gamma_{M1}}{X_z \cdot A_{DG} \cdot f_y}]$$

$$\text{jedoch: } k_{zz} \leq C_{mz} \cdot [1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,d} \cdot \gamma_{M1}}{X_z \cdot A_{DG} \cdot f_y}]$$

Einwirkungskombination 1

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left[1 + (2 \cdot 0,32 - 0,6) \cdot \frac{1255,7}{0,94 \cdot 64,7 \cdot 35,5} \cdot 1,1 \right] = 0,92$$

$$< 0,9 \cdot \left[1 + 1,4 \cdot \frac{1255,7}{0,94 \cdot 64,7 \cdot 35,5} \cdot 1,1 \right] = 1,71$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Nachweis: } \frac{N_{0g,d} \cdot \gamma_{M1}}{X_z \cdot A_{0g} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{W_{0g,z} \cdot f_y} &\leq 1 \\ &= \frac{1255,7}{0,94 \cdot 64,7 \cdot 35,5} + \frac{0,92 \cdot 1755,0}{285,0 \cdot 35,5} = 0,82 < 1 \end{aligned}$$

Einwirkungskombination 5

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left[1 + (2 \cdot 0,32 - 0,6) \cdot \frac{1132,9}{0,94 \cdot 64,7 \cdot 35,5} \cdot 1,1 \right] = 0,92$$

$$< 0,9 \cdot \left[1 + 1,4 \cdot \frac{1132,9}{0,94 \cdot 64,7 \cdot 35,5} \cdot 1,1 \right] = 1,63$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Nachweis: } \frac{N_{0g,d} \cdot \gamma_{M1}}{X_z \cdot A_{0g} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{W_{0g,z} \cdot f_y} &\leq 1 \\ &= \frac{1132,9}{0,94 \cdot 64,7 \cdot 35,5} + \frac{0,92 \cdot 3375,0}{285,0 \cdot 35,5} = 0,92 < 1 \end{aligned}$$

3.2.2 Beulnachweise**3.2.2.1 Plattenbeulen bei Längsspannungen**

$$\eta_1 = \frac{N_{H,0g,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot A_{0g}} + \frac{N_{L,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot A} + \frac{M_{y,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot W_{yo}}$$

Einwirkungskombination 1

$$\eta_1 = \frac{52,7}{35,5 \cdot 64,7} + \frac{33,8}{35,5 \cdot 152,7} + \frac{433,8 \cdot 100}{35,5 \cdot 2218,5} = 0,64 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\eta_1 = \frac{101,3}{35,5 \cdot 64,7} + \frac{382,7 \cdot 100}{35,5 \cdot 2218,5} = 0,58 < 1$$

3.2.2.2 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast (EK1)

- Maximale vertikale Radlast $\max F_{z,d} = 272,2 \text{ kN}$
- Länge der starren Lasteinleitung $s_s = l_{ef} - 2 \cdot t_f = 15,6 - 2 \cdot 1,9 = 11,8 \text{ cm}$
- Beulfeldmaß $a = 600,0 \text{ cm}$
Höhe $h_w = 35,2 \text{ cm}$
Beulfeldstärke $t_w = 1,1 \text{ cm}$
- Beulwert (Typ a) $k_f = 6 + 2 \cdot (h_w / a)^2$
 $= 6 + 2 \cdot (35,2 / 600)^2 = 6,01$
- Kritische Beullast $F_{cr} = 0,9 \cdot k_f \cdot E \cdot t_w^3 / h_w$
 $= 0,9 \cdot 6,01 \cdot 21000 \cdot 1,1^3 / 35,2$
 $= 4295 \text{ kN}$

- Hilfswerte für die Berechnung der Quetschgrenze

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w} = \frac{30,0}{1,1} = 27,27 \quad b_f = \text{Flanschbreite des kleineren Flansches}$$

$$m_2 = 0,02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 0,02 \cdot \left(\frac{35,2}{1,9} \right)^2 = 6,86 \quad (\text{gilt für } \lambda_{z2} > 0,5)$$

$$I_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) = 11,8 + 2 \cdot 1,9 \cdot \left(1 + \sqrt{27,3 + 6,9} \right) = 37,8 \text{ cm} < 600,0 \text{ cm}$$

$$\bullet \text{ Quetschgrenze } F_y = f_y \cdot t_w \cdot I_y = 35,5 \cdot 1,1 \cdot 37,8 = 1477,3 \text{ kN}$$

• Schlankheitsparameter

$$\lambda_{z2} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{1477}{4295}} = 0,59 > 0,5 \rightarrow m_2 = 6,86$$

$$I_y = 11,8 + 2 \cdot 1,9 \cdot \left(1 + \sqrt{27,3 + 6,9} \right) = 37,8 \text{ cm} < 600,0 \text{ cm}$$

$$\bullet \text{ Quetschgrenze } F_y = f_y \cdot t_w \cdot I_y = 35,5 \cdot 1,1 \cdot 37,8 = 1477,3 \text{ kN}$$

• Schlankheitsparameter

$$\lambda_{z2} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{1477}{4295}} = 0,59$$

• Abminderungsfaktor

$$X_F = \frac{0,5}{\lambda_{z2}} = \frac{0,5}{0,59} = 0,85 < 1 \quad \text{maximal zulässiger Wert } X_F = 1,0$$

$$\bullet \text{ wirksame Länge } L_{eff} = X_F \cdot I_y = 0,85 \cdot 37,8 = 32,3 \text{ cm}$$

• Beulnachweis für Querspannungen

$$\eta_2 = \frac{\max F_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w} = \frac{272,2}{35,5 \cdot 32,3 \cdot 1,1} = 0,24 < 1$$

• Interaktion von Biege- und Querspannungen

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 = 0,24 + 0,8 \cdot 0,64 = 0,75 < 1,4$$

3.2.2.3 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

Um das Einknicken des Druckflansches in den Steg zu vermeiden, sollte das Verhältnis h_w/t_w des Stegs folgendes Kriterium erfüllen. [3-1-5/8]:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{h_w \cdot t_w}{b_f \cdot t_f}} \quad k = 0,55 \quad (\text{wenn nur die elastische Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt wird})$$

$$\frac{35,2}{1,1} \leq 0,55 \cdot \frac{21000}{35,5} \cdot \sqrt{\frac{35,2 \cdot 1,1}{30,0 \cdot 1,9}}$$

$$32,0 < 268,2$$

3.3 Ermüdungsnachweise

Beanspruchungsklasse **S1** → Schadensäquivalenter Beiwert λ

Längsspannung $\lambda = 0,250$

Schubspannung $\lambda = 0,436$

Inspektionsintervalle **3** → Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mf} = 1,15$

3.3.1 Nachweis Oberkante Flansch, Schienenschweißnaht (Nachweisstelle a)

3.3.1.1 Normalspannung an der Flanschoberkante

$$\bullet \text{ Schnittgrößen: } \max M_{y,d} = 300,6 \text{ kNm} \quad \min M_{y,d} = 13,5 \text{ kNm}$$

- Spannungen

$$\sigma_{x,max} = \frac{\max M_y}{W_{yo}} = \frac{300,6 \cdot 100}{2218,5} = 13,55 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,min} = \frac{\min M_y}{W_{yo}} = \frac{13,5 \cdot 100}{2218,5} = 0,61 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |13,55 - 0,61| = 12,94 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,250$

$$\Delta \sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_x = 0,250 \cdot 12,94 = 3,24 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 100 Bezugswert: $\Delta \sigma_c = 10,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,24}{10,00 \cdot 1,15} = 0,28 < 1$$

3.3.1.2 Lasteinleitungsspannungen Schienenschweißnaht

- Lastausbreitung an der Flanschoberkante $s_s = 11,8 \text{ cm}$ (wie Beulnachweis)

- exzentrisch vertikale Radlast B

$$B = F_{zd} \cdot \frac{0,75 \cdot b_{\frac{r}{2}} + a_w / 2}{b_{\frac{r}{2}} + a_w} = 191,4 \cdot \frac{0,75 \cdot 60 + 7 / 2}{60 + 7} = 138,6 \text{ kN}$$

- Spannungen an der Schweißnahtunterkante

$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{s_s \cdot 2 \cdot a_w} = \frac{191,4}{11,8 \cdot 2 \cdot 0,7} = 11,56 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = 0,2 \cdot \sigma_{\perp} = 0,2 \cdot 11,56 = 2,31 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\perp} = 0$$

$$\text{Spannungsspiel } \Delta \sigma_{wf} = 11,56 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Spannungsspiel } \Delta \tau_{\parallel} = 2 \cdot \tau_{\parallel} = 4,62 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungskategorie um 1 erhöht! **S1** \rightarrow **S2**

- Nachweis von $\Delta \sigma_{wf} = 11,56 \text{ kN/cm}^2$

$$\text{Schadensäquivalenter Beiwert } \lambda = 0,315$$

$$\Delta \sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_{wf} = 0,315 \cdot 11,56 = 3,64 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 36 Bezugswert: $\Delta \sigma_c = 3,6 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,64}{3,60 \cdot 1,15} = 0,88 < 1$$

- Nachweis von $\Delta \tau_{\parallel} = 2 \cdot \tau_{\parallel} = 4,62 \text{ kN/cm}^2$

$$\text{Schadensäquivalenter Beiwert } \lambda = 0,500$$

$$\Delta \tau_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \tau_{\parallel} = 0,500 \cdot 4,62 = 2,31 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 80 Bezugswert: $\Delta \tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,31}{8,00 \cdot 1,15} = 0,25 < 1$$

3.3.2 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle b)

3.3.2.1 Normalspannung σ_x aus globaler Tragwirkung infolge maximalen Feldmoment

- Widerstandsmoment Stegansatz

$$W_y = \frac{I_y}{z_{sy} - t_f - a_o \cdot \sqrt{2}} = \frac{43259,9}{19,5 - 1,9 - 0,7 \cdot \sqrt{2}} = 2604,4 \text{ cm}^3$$

- Spannungen

$$\sigma_{x,max} = \frac{\max M_y}{W_y} = \frac{300,6 \cdot 100}{2604,4} = 11,54 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,min} = \frac{\min M_y}{W_y} = \frac{13,5 \cdot 100}{2604,4} = 0,52 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |11,54 - 0,52| = 11,02 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,250$

$$\Delta \sigma_{x\bar{E},2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_x = 0,250 \cdot 11,02 = 2,76 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 112 Bezugswert: $\Delta \sigma_{xc} = 11,2 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{x\bar{E},2}}{\Delta \sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,76}{11,20 \cdot 1,15} = 0,21 < 1$$

3.3.2.2 Radasteinleitungsspannung σ_{α}

- Stegpressung
- vertikale Druckspannungen

$$\sigma_{\alpha,d} = \frac{F_{z,d}}{I_{eff} \cdot t_w} = \frac{191,4}{15,6 \cdot 1,1} = 11,13 \text{ kN/cm}^2$$

- Stegbiegung

- Schienenkopfbreite $b = 60,0 \text{ mm}$

- Torsionsmoment aus exzentrischem Radlastangriff

$$T_d = F_{z,d} \cdot b / 4 = 191,4 \cdot 6,0 / 4 = 287,1 \text{ kNcm}$$

- $\beta = \frac{\pi \cdot h_w}{a} = \frac{\pi \cdot 35,2}{600} = 0,184$

- Torsionsträgheitsmoment des Flansches

$$I_t = \frac{b_f \cdot t_f^3}{3} = \frac{30,0 \cdot 1,9^3}{3} = 68,6 \text{ cm}^4$$

$$\eta = \sqrt{\frac{0,75 \cdot a \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\beta)}{\sinh(2\beta) - 2\beta}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,75 \cdot 600 \cdot 1,1^3}{68,6} \cdot \frac{\sinh^2(0,184)}{\sinh(0,369) - 0,369}} = 5,975$$

$$\sigma_{T,d} = \frac{6}{a \cdot t_w^3} \cdot T_d \cdot \eta \cdot \tanh(\eta)$$

$$= \frac{6}{600 \cdot 1,1^3} \cdot 287,1 \cdot 5,975 \cdot \tanh(5,975) = 14,18 \text{ kN/cm}^2$$

- Stegpressung + Stegbiegung

$$\sigma_{\alpha,d,ges.} = \sigma_{\alpha,d} + \sigma_{T,d} = 11,13 + 0,00 = 11,13 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Stegbiegung entfällt})$$

$$\Delta \sigma_{\alpha,c} = 11,13 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1 → S2**

Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,315$

$$\Delta\sigma_{\Sigma 2} = \lambda \cdot \Delta\sigma_{\Sigma 1} = 0,315 \cdot 11,13 = 3,51 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 71 Bezugswert: $\Delta\sigma_{\Sigma c} = 7,1 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\sigma_{\Sigma 2}}{\Delta\sigma_{\Sigma c} / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 3,51}{7,10 \cdot 1,15} = 0,43 < 1$$

3.3.2.3 Schubspannungen τ_{xz} aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung im Feld

- Querkräfte

$$\max V = 95,7 \text{ kN} \quad \min V = -95,7 \text{ kN}$$

$$\Delta V = \max V - \min V = 191,4 \text{ kN}$$

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung

- Statisches Moment am Übergang Schweisnaht - Steg

$$S_{y,f} = S_y - t_w \cdot \frac{(z_{sy} - t_f - a_w \cdot \sqrt{2})^2}{2} = 1076,0 \text{ cm}^3$$

$$\Delta\tau_{xz,c} = \frac{\Delta V \cdot S_{y,f}}{I_y \cdot t_w} = \frac{191,4 \cdot 1076,0}{43259,9 \cdot 1,1} = 4,33 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen (20% der Radlastpressung)

$$\tau_{\alpha xz,d} = 0,2 \cdot \sigma_{\alpha z,d} = 2,23 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta\tau_{xz} = \Delta\tau_{xz,c} + 2 \cdot \tau_{\alpha xz,d} = 4,33 + 2 \cdot 2,23 = 8,78 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1 → S2**

Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,500$

$$\Delta\tau_{\Sigma 2} = \lambda \cdot \Delta\tau_{xz} = 0,500 \cdot 8,78 = 4,39 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 80 Bezugswert: $\Delta\tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\tau_{\Sigma 2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 4,39}{8,00 \cdot 1,15} = 0,48 < 1$$

3.3.2.4 Interaktion

$$\left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\sigma_{\Sigma 2}}{\Delta\sigma_{\Sigma c} / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\sigma_{\Sigma 2}}{\Delta\sigma_{\Sigma c} / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\tau_{\Sigma 2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1$$

$$0,21^3 + 0,43^3 + 0,48^5 = 0,11 < 1$$

3.3.3 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle c)

3.3.3.1 Schubspannungen τ_{xz} aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung

- Querkräfte

$$\max V = 255,2 \text{ kN} \quad \min V = 0,0 \text{ kN}$$

$$\Delta V = \max V - \min V = 255,2 \text{ kN}$$

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung

$$\Delta\tau_{xz,c} = \frac{\Delta V \cdot S_y}{I_y \cdot t_w} = \frac{255,2 \cdot 1076,0}{43259,9 \cdot 1,1} = 5,77 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen (20% der Radlastpressung)

$$\tau_{\alpha z,d} = 0,2 \cdot \sigma_{\alpha z,d} = 2,23 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta \tau_{\alpha z} = \Delta \tau_{\alpha z,c} + 2 \cdot \tau_{\alpha z,d} = 5,77 + 2 \cdot 2,23 = 10,22 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert für **S1** $\lambda = 0,436$

$$\Delta \tau_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \tau_{\alpha z} = 0,436 \cdot 10,22 = 4,46 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta \tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 4,46}{8,00 \cdot 1,15} = 0,48 < 1$$

3.3.3.2 Radasteinleitungsspannung $\sigma_{\alpha z}$

(siehe Abschnitt 3.3.2.2)

3.3.3.3 Interaktion

$$\left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{zE,2}}{\Delta \sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} \right)^5 \leq 1$$

$$0,43^3 + 0,48^5 = 0,11 < 1$$

3.3.4 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle b)

3.3.4.1 Radasteinleitungsspannung $\sigma_{\alpha z}$

- Schweißnahtpressung

$$\sigma_{\alpha z,d,w} = \frac{F_{z,d}}{l_{eff} \cdot 2 \cdot a_o} = \frac{191,4}{15,6 \cdot 2 \cdot 0,7} = 8,75 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannung aus der Stegbiegung in der Schweißnaht $\sigma_{T,d,w}$

$$M_{steg} = \sigma_{T,d} \cdot \frac{t_w^2 \cdot l_{eff}}{6} = 14,18 \cdot \frac{1,1^2 \cdot 15,6}{6} = 44,7 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{T,d,w} = \frac{M_{steg}}{(t_w + a_o) \cdot a_o \cdot l_{eff}} = \frac{44,7}{(1,1 + 0,7) \cdot 0,7 \cdot 15,6} = 2,27 \text{ kN/cm}^2$$

- $\sigma_{\alpha z,d,w} + \sigma_{T,d,w}$

$$\sigma_{\alpha z,d,ges.} = \sigma_{\alpha z,d,w} + \sigma_{T,d,w} = 8,75 + 0,00 = 8,75 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Stegbiegung entfällt})$$

$$\Delta \sigma_{\alpha z} = 8,75 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1** \rightarrow **S2**

$$\text{Schadensäquivalenter Beiwert } \lambda = 0,315$$

$$\Delta \sigma_{zE,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_{\alpha z} = 0,315 \cdot 8,75 = 2,76 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 71 Bezugswert: $\Delta \sigma_{zc} = 7,1 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{zE,2}}{\Delta \sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,76}{7,10 \cdot 1,15} = 0,34 < 1$$

3.3.4.2 Schubspannungen $\tau_{\alpha z}$ aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung

- Querkräfte

$$\max V = 95,7 \text{ kN} \quad \min V = -95,7 \text{ kN}$$

$$\Delta V = \max V - \min V = 191,4 \text{ kN}$$

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung
- Statisches Moment am Übergang Schweißnaht - Flansch

$$S_{y,OG} = S_y - t_w \cdot \frac{(z_{sy} - t_f)^2}{2} = 1057,4 \text{ cm}^3$$

$$\Delta T_{xz,c} = \frac{\Delta V}{I_y} \cdot \frac{S_{y,OG}}{t_w} = \frac{191,4}{43259,9} \cdot \frac{1057,4}{1,1} = 4,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen (20% der Radlastpressung)

$$\tau_{\alpha z,d} = 0,2 \cdot \sigma_{\alpha z,d,w} = 1,75 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta T_{xz} = \Delta T_{xz,c} + 2 \cdot \tau_{\alpha z,d} = 4,25 + 2 \cdot 1,75 = 7,75 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1** → **S2**

$$\text{Schadensäquivalenter Beiwert } \lambda = 0,500$$

$$\Delta T_{E,2} = \lambda \cdot \Delta T_{xz} = 0,500 \cdot 7,75 = 3,88 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta T_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta T_{E,2}}{\Delta T_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,88}{8,00 \cdot 1,15} = 0,42 < 1$$

3.3.4.3 Normalspannung σ_x aus globaler Tragwirkung

- Widerstandsmoment Stegansatz

$$W_y = \frac{I_y}{z_{sy} - t_f} = \frac{43259,9}{19,5 - 1,9} = 2458,0 \text{ cm}^3$$

- Spannungen

$$\sigma_{x,max} = \frac{\max M_y}{W_y} = \frac{300,6 \cdot 100}{2458,0} = 12,23 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,min} = \frac{\min M_y}{W_y} = \frac{13,5 \cdot 100}{2458,0} = 0,55 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |12,23 - 0,55| = 11,68 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,250$

$$\Delta \sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_x = 0,250 \cdot 11,68 = 2,92 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 112 Bezugswert: $\Delta \sigma_{xc} = 11,2 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,92}{11,20 \cdot 1,15} = 0,23 < 1$$

3.3.5 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle c)

3.3.5.1 Schubspannungen τ_{xz} aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung

- Querkräfte

$$\max V = 255,2 \text{ kN} \quad \min V = 0,0 \text{ kN}$$

$$\Delta V = \max V - \min V = 255,2 \text{ kN}$$

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung

$$\Delta T_{xz,c} = \frac{\Delta V}{I_y} \cdot \frac{S_{y,OG}}{t_w} = \frac{255,2}{43259,9} \cdot \frac{1057,4}{1,1} = 5,67 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen (20% der Radlastpressung)

$$\tau_{\alpha z, d} = 0,2 \cdot \sigma_{\alpha z, d} = 1,75 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta \tau_{\alpha z} = \Delta \tau_{\alpha z, c} + 2 \cdot \tau_{\alpha z, d} = 5,67 + 2 \cdot 1,75 = 9,17 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert für **S1** $\lambda = 0,436$

$$\Delta \tau_{E, 2} = \lambda \cdot \Delta \tau_{\alpha z} = 0,436 \cdot 9,17 = 4,00 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta \tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E, 2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 4,00}{8,00 \cdot 1,15} = 0,43 < 1$$

3.3.5.2 Radlasteinleitungsspannung $\sigma_{\alpha z}$

(siehe Abschnitt 3.3.4.1)

3.3.6 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle d)

3.3.6.1 Schubspannungen $\tau_{\alpha z}$ aus globaler Tragwirkung

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung
- Statisches Moment am Übergang Schweisnaht - Flansch

$$S_{y,UG} = S_y - t_w \cdot \frac{(h - z_{sy} - t_f)^2}{2} = 1057,4 \text{ cm}^3$$

$$\Delta \tau_{\alpha z, c} = \frac{\Delta V \cdot S_{y,UG}}{I_y \cdot t_w} = \frac{191,4 \cdot 1057,4}{43259,9 \cdot 1,1} = 4,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta \tau_{\alpha z} = \Delta \tau_{\alpha z, c} = 4,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1** \rightarrow **S2**

Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,500$

$$\Delta \tau_{E, 2} = \lambda \cdot \Delta \tau_{\alpha z} = 0,500 \cdot 4,25 = 2,13 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta \tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E, 2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 2,13}{8,00 \cdot 1,15} = 0,23 < 1$$

3.3.6.2 Normalspannung σ_x aus globaler Tragwirkung

- Widerstandsmoment Stegansatz

$$W_y = \frac{I_y}{h - z_{sy} - t_f} = \frac{43259,9}{39,0 - 19,5 - 1,9} = 2458,0 \text{ cm}^3$$

- Spannungen

$$\sigma_{x, \max} = \frac{\max M_y}{W_y} = \frac{300,6 \cdot 100}{2458,0} = 12,23 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x, \min} = \frac{\min M_y}{W_y} = \frac{13,5 \cdot 100}{2458,0} = 0,55 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x, \max} - \sigma_{x, \min}| = |12,23 - 0,55| = 11,68 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,250$

$$\Delta \sigma_{E, 2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_x = 0,250 \cdot 11,68 = 2,92 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 112 Bezugswert: $\Delta\sigma_{xc} = 11,2 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\sigma_{x\bar{E}2}}{\Delta\sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,92}{11,20 \cdot 1,15} = 0,23 < 1$$

3.3.7 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle e)

- Schubspannungen τ_{xz} aus globaler Tragwirkung

$$\Delta\tau_{xz,c} = \frac{\Delta V \cdot S_{y,UG}}{I_y \cdot t_w} = \frac{255,2 \cdot 1057,4}{43259,9 \cdot 1,1} = 5,67 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta\tau_{xz} = \Delta\tau_{xz,c} = 5,67 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert für S1 $\lambda = 0,436$

$$\Delta\tau_{E2} = \lambda \cdot \Delta\tau_{xz} = 0,436 \cdot 5,67 = 2,47 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta\tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\tau_{E2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,47}{8,00 \cdot 1,15} = 0,27 < 1$$

3.4 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

3.4.1 Vertikale Durchbiegung (vereinfacht)

- Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Q,ser} = 1,0$

- Radlast $F = 180,0 \text{ kN}$

- $a = 4,0 > 0,65 \cdot l = 3,9 \rightarrow \delta_{z,2}$ ist maßgebend

- Durchbiegung aus Radlast

$$\begin{aligned} \delta_{z,1} &= \frac{F \cdot (l - a) \cdot (3 \cdot l^2 - (l - a)^2)}{48 \cdot E \cdot I_y} \\ &= \frac{180,0 \cdot (600 - 400) \cdot (3 \cdot 600^2 - (600 - 400)^2)}{48 \cdot 21000 \cdot 43259,9} = 0,859 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\delta_{z,2} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_y} = \frac{180,0 \cdot 600^3}{48 \cdot 21000 \cdot 43259,9} = 0,892 \text{ cm}$$

- Durchbiegung aus Eigengewicht

$$\delta_{z,g} = 0,013 \cdot \frac{g \cdot l^4}{E \cdot I_y} = 0,013 \cdot \frac{0,030 \cdot 600^4}{21000 \cdot 43259,9} = 0,056 \text{ cm}$$

$$\delta_{z,ges.} = 0,892 + 0,056 = 0,947 \text{ cm}$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \delta_{z,ges.} = 0,947 \text{ cm} < l/500 = 1,200 \text{ cm}$$

3.4.2 Stegblechatmen und Untergurtschwingungen

- Stegblechatmen

$$b_w = h_{steg} - \sqrt{2} a_o - \sqrt{2} a_u = 332,2 \text{ mm} \quad (= \text{kleinere Seitenlänge des Stegblechs})$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{b_w}{t_w} = \frac{332,2}{11,0} = 30,2 < 120$$

- Untergurtschwingungen

$$i_{z,UG} = \sqrt{\frac{I_{z,UG}}{A_{UG}}} = \sqrt{\frac{4275,0}{30,0 \cdot 1,9}} = 8,7 \text{ cm}$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{l}{i_{z,UG}} = \frac{600}{8,7} = 69 < 250$$

Anlage 2: Berechnungslogarithmus für den optimierten Querschnitt

Kranbahnträger als Schweißprofilträger für "schweren Kranbetrieb"

10.11.2015

Allgemeine Angaben zu Kran und Kranbahnträger:

- Zweiträgerbrückenkran mit Schlingerverband und Hakenbetrieb
- Einfeldträger
- Räder können den Träger verlassen

Vorgaben des Bauherrn:

- Hubklasse HC2
- Beanspruchungsklasse S1
- Inspektionsintervalle 3

Angaben zum Kran: (Herstellerangaben)

- Vertikale Radlasten:

- | | | | |
|-----------|--------------|-------------|----------|
| - Achse 1 | Hublast | $Q_{h,1} =$ | 120,0 kN |
| | Eigengewicht | $Q_{c,1} =$ | 60,0 kN |
| - Achse 2 | Hublast | $Q_{h,2} =$ | 120,0 kN |
| | Eigengewicht | $Q_{c,2} =$ | 60,0 kN |

- Horizontale Radlasten

- | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------|---------------|
| - aus Schräglauf | Achse 1 | $H_s =$ | 50,0 kN |
| - aus Beschleunigen und Bremsen | | | |
| | längs zur Fahrbahn | $H_L =$ | 25,0 kN |
| | quer zur Fahrbahn | $H_T =$ | $\pm 26,0$ kN |

- Kran-Fahrgeschwindigkeit

- Hubgeschwindigkeit $v_h =$ 5,0 m/min

- Radstand $a =$ 4000,0 mm

- Kranfahrwerksystem IFF

Statisches System :

- einfeldrige Kranbahn

- Spannweite

 $l = 6000,0 \text{ mm}$

- Schlingerverband

- Verbandbreite

 $b = 1000,0 \text{ mm}$

- Verbandteilung

 $t = 2000,0 \text{ mm}$

Angaben zur Kranbahn und Kranschiene:

- Eigenlast d. Kranbahn einschl. Schlingerver. u. Laufsteg

 $g = 3,0 \text{ kN/m}$

- Kranbahn

- Werkstoff

S355

- Obergurt

Breite

296,0 mm

Stärke

17,0 mm

- Steg

Höhe

414,0 mm

Stärke

8,0 mm

- Untergurt

Breite

151,0 mm

Stärke

15,0 mm

Obere Halsnaht

Stumpfnah

 $a_o = 7,0 \text{ mm}$

Untere Halsnaht

 $a_u = 7,0 \text{ mm}$

- Kranschiene

- Schienenform

Flachstahlschiene

Werkstoff

S355

Schienenbreite

 $b_s = 60,0 \text{ mm}$

Schienendicke

50,0 mm

- Schweißnaht

 $a_w = 7,0 \text{ mm}$

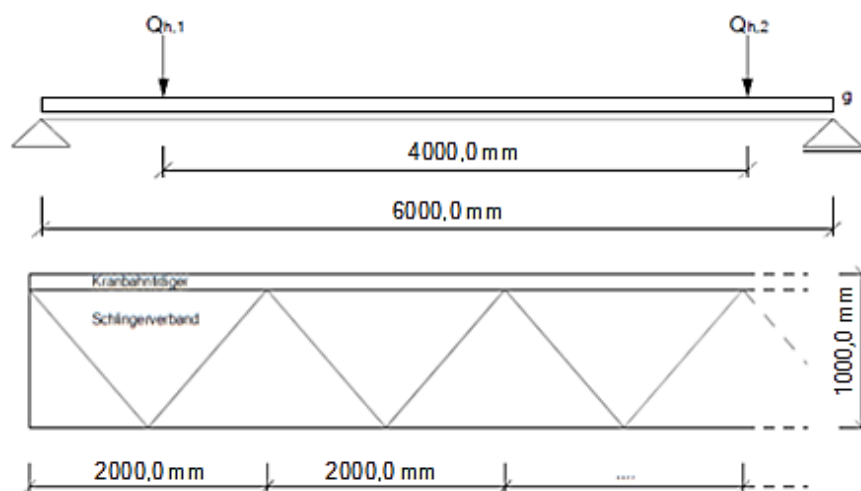
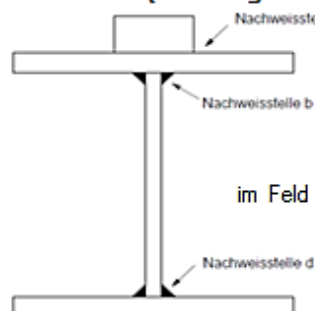
Schweißnahtform

durchlaufende Naht

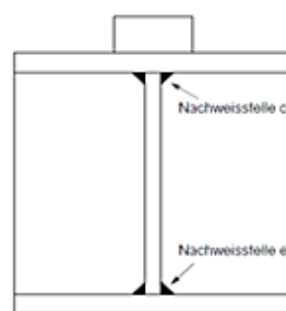
Querschnittswerte:

$A =$	$106,1 \text{ cm}^2$
$I_y =$	$35159,9 \text{ cm}^4$
$W_{y0} =$	$2098,1 \text{ cm}^3$
$W_{yu} =$	$1262,8 \text{ cm}^3$
$I_{z,0S} =$	$3674,0 \text{ cm}^4$
$I_{z,uS} =$	$430,4 \text{ cm}^4$
$S_y =$	$891,2 \text{ cm}^3$
$S_{y,0S} =$	$800,5 \text{ cm}^3$
$S_{y,uS} =$	$613,6 \text{ cm}^3$

Querschnittsklasse: 2

Statisches System:**Nachweisstellen (Ermüdungsnachweise):**

im Feld



am Auflager

Zusammenfassung**1. Belastung****2. Schnittgrößen****3. Nachweise****3.1 Tragfähigkeitsnachweise****3.1.2 Grundwerkstoff****3.1.2.1 Maximales Feldmoment**

- Biegespannung $\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{34,45}{35,50} = 0,97 < 1$
- max. Stegnormalspannung aus Radlasteinleitung $\frac{\sigma_{\alpha,Ed}}{\sigma_{R,d}} = \frac{20,36}{35,50} = 0,57 < 1$
- max. Vergleichsspannungen am Übergang Flansch zu Steg

Einwirkungskombination 1

Laststellung maximales Moment

$$\left(\frac{21,98}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{20,36}{35,5}\right)^2 - \frac{21,98}{35,5} \cdot \frac{20,36}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{4,07 + 3,95}{35,5}\right)^2 = 0,51 < 1$$

Laststellung Aufgarnnähe (maximale Querkraft):

$$\left(\frac{20,36}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{4,07 + 10,75}{35,5}\right)^2 = 0,85 < 1$$

Einwirkungskombination 5

Laststellung maximales Moment

$$\left(\frac{20,02}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{18,18}{35,5}\right)^2 - \frac{20,02}{35,5} \cdot \frac{18,18}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{3,64 + 3,46}{35,5}\right)^2 = 0,41 < 1$$

Laststellung Aufgarnnähe (maximale Querkraft):

$$\left(\frac{18,18}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{3,64 + 9,57}{35,5}\right)^2 = 0,68 < 1$$

3.1.2.2 Maximale Eckspannung im Obergut**Einwirkungskombination 1**

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{29,05}{35,50} = 0,82 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{33,62}{35,50} = 0,95 < 1$$

3.1.2.3 Maximale Querkraft

$$\frac{\tau_d}{\tau_{R,d}} = \frac{11,97}{20,50} = 0,58 < 1$$

3.1.3 Schweißnähte**Obere Halsnaht**

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{19,59}{43,56} = 0,45 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 8,2 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Untere Halsnaht

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{8,16}{43,56} = 0,19 < 1$$

Schienenschweißnaht**Einwirkungskombination 1**

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{22,11}{43,56} = 0,51 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 11,7 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{\sigma_{v.w,d}}{\sigma_{w.R,d}} = \frac{21,47}{43,56} = 0,49 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 11,8 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

3.2 Stabilitätsnachweise

3.2.1 Biegedrillknicken - Knicken des Obergurtes

Einwirkungskombination 1

$$\frac{1098,0}{0,93 \cdot 56,9 \cdot 35,5} + \frac{0,93 \cdot 1755,0}{248,2 \cdot 35,5} = 0,84 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{991,3}{0,93 \cdot 56,9 \cdot 35,5} + \frac{0,93 \cdot 3375,0}{248,2 \cdot 35,5} = 0,97 < 1$$

3.2.2 Beulnachweise

3.2.2.1 Plattenbeulen bei Längsspannungen

Einwirkungskombination 1

$$\eta_1 = \frac{52,7}{35,5 \cdot 56,9} + \frac{33,8}{35,5 \cdot 106,1} + \frac{435,0 \cdot 100}{35,5 \cdot 2098,1} = 0,68 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\eta_1 = \frac{101,3}{35,5 \cdot 56,9} + \frac{382,7 \cdot 100}{35,5 \cdot 2098,1} = 0,62 < 1$$

3.2.2.2 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast (EK1)

$$\eta_2 = \frac{\max F_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot l_{eff} \cdot t_w} = \frac{272,2}{35,5 \cdot 21,0 \cdot 0,8} = 0,50 < 1$$

3.2.2.3 Interaktion

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 = 0,50 + 0,8 \cdot 0,68 = 1,05 < 1,4$$

3.2.2.4 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{h_w \cdot t_w}{b_f \cdot t_f}} \quad ; \quad = 51,8 < 264,0$$

3.3 Ermüdungsnachweise

3.3.1 Nachweis Oberkante Flansch, Schienenschweißnaht (Nachweisstelle a)

Oberkante Flansch

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,42}{10,00 \cdot 1,15} = 0,3 < 1$$

Schienenschweißnaht

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,24}{3,60 \cdot 1,15} = 0,78 < 1$$

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,05}{8,00 \cdot 1,15} = 0,22 < 1$$

3.3.2 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle b)

3.3.2.1 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{x,E,2}}{\Delta \sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,87}{11,20 \cdot 1,15} = 0,22 < 1$$

3.3.2.2 Radasteinleitungsspannung σ_{∞}

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{z,E,2}}{\Delta \sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 4,51}{7,10 \cdot 1,15} = 0,55 < 1$$

3.3.2.3 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{5,63}{1,15} = 0,61 < 1$$

3.3.2.4 Interaktion

$$0,22^3 + 0,55^3 + 0,61^5 = 0,27 < 1$$

3.3.3 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle c)

3.3.3.1 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{5,71}{1,15} = 0,62 < 1$$

3.3.3.2 Interaktion

$$0,55^3 + 0,62^5 = 0,26 < 1$$

3.3.4 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle b)

3.3.4.1 Radlasteinleitungsspannung σ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \sigma_{zc}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{zE,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{7,10} \cdot \frac{2,58}{1,15} = 0,32 < 1$$

3.3.4.2 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{4,36}{1,15} = 0,47 < 1$$

3.3.4.3 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \sigma_{xc}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{xE,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{11,20} \cdot \frac{3,07}{1,15} = 0,24 < 1$$

3.3.5 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle c)

• Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{4,59}{1,15} = 0,50 < 1$$

3.3.6 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle d)

3.3.6.1 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{2,09}{1,15} = 0,23 < 1$$

3.3.6.2 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \sigma_{xc}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{xE,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{11,20} \cdot \frac{5,38}{1,15} = 0,42 < 1$$

3.3.7 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle e)

• Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Fi}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mf}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{2,43}{1,15} = 0,26 < 1$$

3.4. Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

3.4.1 Vertikale Durchbiegung

$$\delta_{z,ges.} = 1,165 \text{ cm} < 1,500 = 1,200 \text{ cm}$$

3.4.2 Stegblechatmen und Untergurtschwingungen

• Stegblechatmen

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{394,2}{8,0} = 49,3 < 120$$

• Untergurtschwingungen

$$\frac{l}{i_{z,UG}} = \frac{600}{4,4} = 138 < 250$$

1. Belastung

1.1 Schwingbeiwerte nach (DIN EN 1991-3 Tab. 2.1, 2.4, 2.6, 2.10)

φ_1 : $0,9 < \varphi_1 < 1,1$; Schwingungsanregung infolge Anheben der Hublast

$$\varphi_1 = 1,1$$

φ_2 : $\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h$; Dynamische Wirkungen beim Anheben der Hublast vom Boden

$$v_h = 5,0 \cdot \frac{m}{\min} = \frac{5,0}{60} \cdot \frac{m}{s}$$

$$\beta_2 = 0,34 \quad \text{Hubklasse HC2}$$

$$\varphi_{2,\min} = 1,1 \quad \text{Hubklasse HC2}$$

$$\varphi_2 = 1,1 + 0,34 \cdot 5,0 / 60$$

$$\varphi_2 = 1,13$$

φ_4 : $\varphi_4 = 1,0$; Dynamische Wirkung hervorgerufen durch Fahren auf Schienen

φ_5 : $\varphi_5 = 1,5$; Dynamische Wirkungen verursacht durch Antriebskräfte

$\varphi_{fat,1}$: $\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2}$; Schadensäquivalenter dynamischer Vergrößerungsbeiwert

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + 1,1}{2} = 1,05$$

$\varphi_{fat,2}$: $\varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2} = \frac{1 + 1,13}{2} = 1,07$

1.2 Eigengewicht Kranbahn

Eigenlast des Kranbahnträgers einschließlich Schlingerverband und Laufsteg

$$g = 3,0 \text{ kN/m}$$

1.3 Verkehrslasten von Kranaufrädern (nach Herstellerangaben)

1.3.1 Vertikale Lasten aus Kranbetrieb

Achse 1:	$Q_{h,1} = 120,0 \text{ kN}$	(inf. Hublast)
	$Q_{c,1} = 60,0 \text{ kN}$	(inf. Eigengewicht)
Achse 2:	$Q_{h,2} = 120,0 \text{ kN}$	(inf. Hublast)
	$Q_{c,2} = 60,0 \text{ kN}$	(inf. Eigengewicht)

1.3.2 Horizontale Kranlasten

1.3.2.1 Horizontale Kranlasten aus Anfahren und Bremsen

längs zur Fahrbahn	$H_L = 25,0 \text{ kN}$
quer zur Fahrbahn	$H_T = \pm 26,0 \text{ kN}$

1.3.2.2 Horizontale Kranlasten aus Schräglauf

Vorderachse	$H_{s1} = 50,0 \text{ kN}$
-------------	----------------------------

1.3.3 Lastgruppenbildung (DIN EN 1991-3, Tab.2.2)

1.3.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit (DIN EN 1991-3, Tab.2.2)

Lastgruppe 1:

Vertikale Radlasten:

$$F_1 = \varphi_1 \cdot Q_{c,1} + \varphi_2 \cdot Q_{h,1} = 1,1 \cdot 60,0 + 1,13 \cdot 120,0 = 201,6 \text{ kN}$$

$$F_2 = \varphi_1 \cdot Q_{c,2} + \varphi_2 \cdot Q_{h,2} = 1,1 \cdot 60,0 + 1,13 \cdot 120,0 = 201,6 \text{ kN}$$

Horizontalkraft längs der Fahrbahn:

$$H_L = H_L = 25,0 \text{ kN}$$

Horizontalkraft quer der Fahrbahn:

$$H_T = H_T = \pm 26,0 \text{ kN}$$

Lastgruppe 2:

- Nur nötig bei Verwendung von Greifern und Magneten → kann entfallen!

Lastgruppe 3:

- LG1 maßgebend → kann entfallen!

Lastgruppe 4:

- LG1 maßgebend → kann entfallen!

Lastgruppe 5:

Vertikale Radlasten:

$$F_1 = \varphi_4 \cdot Q_{c,1} + \varphi_4 \cdot Q_{h,1} = 1,0 \cdot 60,0 + 1,0 \cdot 120,0 = 180,0 \text{ kN}$$

$$F_2 = \varphi_4 \cdot Q_{c,2} + \varphi_4 \cdot Q_{h,2} = 1,0 \cdot 60,0 + 1,0 \cdot 120,0 = 180,0 \text{ kN}$$

Horizontalkraft aus Schräglaufl:

$$H_1 = 1,0 \cdot H_{s1} = 1,0 \cdot 50,0 = 50,0 \text{ kN}$$

Lastgruppe 6:

- LG5 maßgebend → kann entfallen!

Lastgruppe 7:

- LG1 maßgebend → kann entfallen!

Lastgruppe 8:

- Es werden keine Prüfversuche durchgeführt. → kann entfallen!

Lastgruppe 9:

- Pufferkraft nicht bemessungsrelevant für Kranbahnträger → kann entfallen!

Lastgruppe 10:

- Kippkraft nicht bemessungsrelevant für Kranbahnträger → kann entfallen!

1.3.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN EN 1991-6 NA, Tab. NA1)

Lastgruppe 11: (für Verformungsberechnung – Vertikal)

Vertikale Radlasten:

$$F_1 = 1 \cdot Q_{c,1} + 1 \cdot Q_{h,1} = 1,0 \cdot 60,0 + 1,0 \cdot 120,0 = 180,0 \text{ kN}$$

$$F_2 = 1 \cdot Q_{c,2} + 1 \cdot Q_{h,2} = 1,0 \cdot 60,0 + 1,0 \cdot 120,0 = 180,0 \text{ kN}$$

Lastgruppe 12/13: (für Verformungsberechnung – Horizontal)

Der Verformungsnachweis (horizontal) wird nicht gef

1.3.3.3 Grenzzustand der Ermüdung (DIN EN 1991-6, 9.3)**Lastgruppe 14:**

Vertikale Radlasten:

$$F_1 = \varphi_{fat,1} \cdot Q_{c,1} + \varphi_{fat,2} \cdot Q_{h,1} = 1,05 \cdot 60,0 + 1,07 \cdot 120,0 \\ = 191,4 \text{ kN}$$

$$F_2 = \varphi_{fat,1} \cdot Q_{c,2} + \varphi_{fat,2} \cdot Q_{h,2} = 1,05 \cdot 60,0 + 1,07 \cdot 120,0 \\ = 191,4 \text{ kN}$$

2. Schnittkräfte**2.1 Schnittkräfte infolge der einzelnen Lasten****2.1.1 Verkehrslasten von Kranlaufträdern****Lastgruppe 1:**

$$\text{Radlasten: } F_1 = 201,6 \text{ kN} \quad ; \quad F_2 = 201,6 \text{ kN}$$

• **Culmannsche Laststellung**

$$\sum F = 201,6 + 201,6 = 403,2 \text{ kN}$$

Abstand der Resultierenden $\sum F$ von der maximalen Radlast F_{\max} :

$$c = a \cdot \frac{F_{\min}}{\sum F} = 4 \cdot \frac{201,6}{403,2} = 2,00 \text{ m}$$

Culmannsche Laststellung:

$$x = \frac{l}{2} - \frac{c}{2} = \frac{6,0}{2} - \frac{2,00}{2} = 2,00 \text{ m}$$

Charakteristisches Moment $M_{y,k,1}$ aus Radlasten:

$$A_v = \frac{l - x - c}{l} \cdot \sum F = \frac{6,0 - 2,00 - 2,00}{6,0} \cdot 403,2 = 134,4 \text{ kN}$$

$$M_{y,k,1} = A_v \cdot x = 134,4 \text{ kN} \cdot 2,00 \text{ m} = 268,8 \text{ kNm}$$

• **Laststellung mit F_{\max} in Trägemitte**

$$M_{y,k,2} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} = \frac{201,6 \cdot 6,0}{4} = 302,4 \text{ kNm}$$

• **Maximales Biegemoment $\max M_{y,k}$:**

$$\max M_{y,k} = \max (M_{y,k,1} ; M_{y,k,2}) = 302,4 \text{ kNm}$$

• **Zugehörige Querkraft $V_{z,zug M,k}$**

$$V_{z,zug M,k,1} = A_v = 134,4 \text{ kN}$$

$$V_{z,zug M,k,2} = \frac{F_{\max}}{2} = \frac{201,6}{2} = 100,8 \text{ kN}$$

$$V_{z,zug M,k} = 100,8 \text{ kN}$$

• **Maximale Querkraft $\max V_{z,k}$:**

$$\max V_{z,k} = F_{\max} + \frac{l - a}{l} \cdot F_{\min} = 201,6 + \frac{6,0 - 4,00}{6,0} \cdot 201,6 \\ = 268,8 \text{ kN}$$

Lastgruppe 5,11 und 12:

Radlasten: $F_1 = 180,0 \text{ kN}$; $F_2 = 180,0 \text{ kN}$

- **Culmannsche Laststellung**

$$\sum F = 180,0 + 180,0 = 360,0 \text{ kN}$$

Abstand der Resultierenden $\sum F$ von der maximalen Radlast F_{\max} :

$$c = a \cdot \frac{F_{\min}}{\sum F} = 4 \cdot \frac{180,0}{360,0} = 2,00 \text{ m}$$

Culmannsche Laststellung:

$$x = \frac{l}{2} - \frac{c}{2} = \frac{6,0}{2} - \frac{2,00}{2} = 2,00 \text{ m}$$

Charakteristisches Moment $M_{y,k,1}$ aus Radlasten:

$$A_v = \frac{l - x - c}{l} \cdot \sum F = \frac{6,0 - 2,00 - 2,00}{6,0} \cdot 360,0 = 120,0 \text{ kN}$$

$$M_{y,k,1} = A_v \cdot x = 120,0 \text{ kN} \cdot 2,00 \text{ m} = 240,0 \text{ kNm}$$

- **Laststellung mit F_{\max} in Trägemitte**

$$M_{y,k,2} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} = \frac{180,0 \cdot 6,0}{4} = 270,0 \text{ kNm}$$

- **Maximales Biegemoment $\max M_{y,k}$:**

$$\max M_{y,k} = \max (M_{y,k,1} ; M_{y,k,2}) = \underline{270,0 \text{ kNm}}$$

- **Zugehörige Querkraft $V_{z,\text{zug } M,k}$**

$$V_{z,\text{zug } M,k,1} = A_v = 120,0 \text{ kN}$$

$$V_{z,\text{zug } M,k,2} = \frac{F_{\max}}{2} = \frac{180,0}{2} = 90,0 \text{ kN}$$

$$V_{z,\text{zug } M,k} = 90,0 \text{ kN}$$

- **Maximale Querkraft $\max V_{z,k}$:**

$$\begin{aligned} \max V_{z,k} &= F_{\max} + \frac{l - a}{l} \cdot F_{\min} = 180,0 + \frac{6,0 - 4,00}{6,0} \cdot 180,0 \\ &= 240,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

Lastgruppe 14:

Radlasten: $F_1 = 191,4 \text{ kN}$; $F_2 = 191,4 \text{ kN}$

- **Culmannsche Laststellung**

$$\sum F = 191,4 + 191,4 = 382,8 \text{ kN}$$

Abstand der Resultierenden $\sum F$ von der maximalen Radlast F_{\max} :

$$c = a \cdot \frac{F_{\min}}{\sum F} = 4 \cdot \frac{191,4}{382,8} = 2,00 \text{ m}$$

Culmannsche Laststellung:

$$x = \frac{l}{2} - \frac{c}{2} = \frac{6,0}{2} - \frac{2,00}{2} = 2,00 \text{ m}$$

Charakteristisches Moment $M_{y,k,1}$ aus Radlasten:

$$A_v = \frac{l - x - c}{l} \cdot \Sigma F = \frac{6,0 - 2,00 - 2,00}{6,0} \cdot 382,8 = 127,6 \text{ kNm}$$

$$M_{y,k,1} = A_v \cdot x = 127,6 \text{ kN} \cdot 2,00 \text{ m} = 255,2 \text{ kNm}$$

- Laststellung mit F_{\max} in Trägemitte

$$M_{y,k,2} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} = \frac{191,4 \cdot 6,0}{4} = 287,1 \text{ kNm}$$

- Maximales Biegemoment $\max M_{y,k}$:

$$\max M_{y,k} = \max (M_{y,k,1} ; M_{y,k,2}) = \underline{287,1 \text{ kNm}}$$

- Zugehörige Querkraft $V_{\text{zug } M,k}$

$$V_{\text{zug } M,k,1,r} =$$

$$V_{\text{zug } M,k,1,l} = \text{entfällt}$$

$$=$$

$$V_{\text{zug } M,k,2} = \frac{F_{\max}}{2} = \frac{191,4}{2} = 95,7 \text{ kN}$$

$$V_{\text{zug } M,k} = 95,7 \text{ kN}$$

- Maximale Querkraft $\max V_{z,k}$:

$$\begin{aligned} \max V_{z,k} &= F_{\max} + \frac{l - a}{l} \cdot F_{\min} = 191,4 + \frac{6,0 - 4,00}{6,0} \cdot 191,4 \\ &= 255,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

2.1.2 Eigengewicht Kranbahnträger

$$g = 3,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\begin{aligned} M_{y,k} &= \frac{g \cdot l}{2} \cdot x - g \cdot \frac{x^2}{2} = \frac{3,0 \cdot 6,0}{2} \cdot 3,00 - 3,0 \cdot \frac{3,00^2}{2} \\ &= 13,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{z,k} &= g \cdot \left(\frac{l}{2} - x \right) = 3,0 \cdot \left(\frac{6,0}{2} - 3,00 \right) \\ &= 0,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\max V_{z,k} = \frac{g \cdot l}{2} = \frac{3,0 \cdot 6,0}{2} = 9,0 \text{ kN}$$

2.1.3 Brems- bzw. Anfahrkraft H_L und H_r (Tragwirkungssplitting)

Lastgruppe 1:

- $H_L = 25,0 \text{ kN}$

$$A = B = \max V_{z,k} = \frac{H_L \cdot h}{l} = \frac{25,0 \cdot 496,0}{6000} = 2,1 \text{ kN}$$

$$\max M_{y,k} = 2,1 \cdot 3,0 \text{ m} = 6,3 \text{ kNm}$$

$$N_L = \pm 25,0 \text{ kN}$$

- $H_T = \pm 26,0 \text{ kN}$

Gurtnormalkraft $N_{H,Og}$ des Schlingerverbandes (vereinfacht)

$$\begin{aligned}\sum M_A = 0 &= 3,0 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ kN} - 0,0 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ kN} - B \cdot 6,0 \text{ m} \\ B &= 13,0 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_1 = 0 &= - 0,0 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ kN} + 3,0 \text{ m} \cdot 13,0 \text{ kN} - 1,0 \text{ m} \cdot N_{H,Og} \\ N_{H,Og} &= \pm 39,0 \text{ kN}\end{aligned}$$

Lokale Biegung $M_{z,k,lokal}$ des Oberquertes (vereinfacht)

Stelle $\max M_{y,k}$ bei: 3,00 m

Verbandteilung 2,00 m

Auflager davor bei: 2,0 m

Auflager danach bei: 4,0 m

$$\text{Faktor } M_z: \frac{(3,00 \text{ m} - 2,0 \text{ m}) \cdot (4,0 \text{ m} - 3,00 \text{ m})}{(4,0 \text{ m} - 2,00 \text{ m})} = 0,50 \text{ m}$$

$$M_{z,k,lokal} = \pm 26,0 \text{ kN} \cdot 0,50 \text{ m} = \pm 13,0 \text{ kNm}$$

2.1.4 Seitenkraft H_s (Tragwirkungssplitting)

Lastgruppe 5 und 12:

- $H_s = 50,0 \text{ kN}$

Gurtnormalkraft $N_{H,Og}$ des Schlingerverbandes (vereinfacht)

$$\begin{aligned}\sum M_A = 0 &= 3,0 \text{ m} \cdot 50,0 \text{ kN} - B \cdot 6,0 \text{ m} \\ B &= 25,0 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_1 = 0 &= 3,0 \text{ m} \cdot 25,0 \text{ kN} + 1,0 \text{ m} \cdot N_{H,Og} \\ N_{H,Og} &= 75,0 \text{ kN}\end{aligned}$$

Lokale Biegung $M_{z,k,lokal}$ des Oberquertes (vereinfacht)

Stelle $\max M_{y,k}$ bei: 3,00 m

Verbandteilung 2,00 m

Auflager davor bei: 2,0 m

Auflager danach bei: 4,0 m

$$\text{Faktor } M_z: \frac{(3,00 \text{ m} - 2,0 \text{ m}) \cdot (4,0 \text{ m} - 3,00 \text{ m})}{(4,0 \text{ m} - 2,00 \text{ m})} = 0,50 \text{ m}$$

$$M_{z,k,lokal} = 50,0 \text{ kN} \cdot 0,50 \text{ m} = 25,0 \text{ kNm}$$

2.2 Schnittgrößen für Einwirkungskombinationen

2.2.1 Schnittgrößen für Einwirkungskombination 1

(1,35 · Eigengewicht Kranbahnträger + 1,35 · Lastgruppe 1)

Laststellung Maximales Moment:

$$\begin{aligned} M_{y,d} &= 1,35 \cdot 13,5 + 1,35 \cdot (302,4 + 6,3) &= 435,0 \text{ kNm} \\ M_{z,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 13,0 &= 17,6 \text{ kNm} \\ V_{z,\text{zug}M,d} &= 1,35 \cdot 0,0 + 1,35 \cdot (100,8 + 2,1) &= 138,9 \text{ kN} \\ N_{H,Og,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 39,0 &= 52,7 \text{ kN} \\ N_{L,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 25,0 &= 33,8 \text{ kN} \\ F_{z,d} &= 1,35 \cdot 201,6 &= 272,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Laststellung Maximale Querkraft:

$$V_{z,d} = 1,35 \cdot 9,0 + 1,35 \cdot (268,8 + 2,1) = 377,9 \text{ kN}$$

2.2.2 Schnittgrößen für Einwirkungskombination 5

(1,35 · Eigengewicht Kranbahnträger + 1,35 · Lastgruppe 5)

Laststellung Maximales Moment:

$$\begin{aligned} M_{y,d} &= 1,35 \cdot 13,5 + 1,35 \cdot 270,0 &= 382,7 \text{ kNm} \\ M_{z,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 25,0 &= 33,8 \text{ kNm} \\ V_{z,\text{zug}M,d} &= 1,35 \cdot 0,0 + 1,35 \cdot 90,0 &= 121,5 \text{ kN} \\ N_{H,Og,d} &= 1,35 \cdot 0 + 1,35 \cdot 75,0 &= 101,3 \text{ kN} \\ F_{z,d} &= 1,35 \cdot 180,0 &= 243,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

Laststellung Maximale Querkraft:

$$V_{z,d} = 1,35 \cdot 9,0 + 1,35 \cdot 240,0 = 336,2 \text{ kN}$$

2.2.3 Schnittgrößen für Einwirkungskombination 14

(1,0 · Eigengewicht Kranbahnträger + 1,0 · Lastgruppe 14)

Laststellung Minimales Moment:

$$M_{y,d} = 1,0 \cdot 13,5 + 1,0 \cdot 0,0 = 13,5 \text{ kNm}$$

Laststellung Maximales Moment:

$$\begin{aligned} M_{y,d} &= 1,0 \cdot 13,5 + 1,0 \cdot 287,1 &= 300,6 \text{ kNm} \\ F_{z,d} &= 1,0 \cdot 191,4 &= 191,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Laststellung beide Räder links der Stelle x:

$$V_{z,\text{zug}M,d,l} = 1,0 \cdot 0,0 - 1,0 \cdot 95,7 = -95,7 \text{ kN}$$

Laststellung beide Räder rechts der Stelle x:

$$V_{z,\text{zug}M,d,r} = 1,0 \cdot 0,0 + 1,0 \cdot 95,7 = 95,7 \text{ kN}$$

Laststellung Maximale Querkraft:

$$V_{z,d} = 1,0 \cdot 0,0 + 1,0 \cdot 255,2 = 255,2 \text{ kN}$$

3. Nachweise

3.1 Tragfähigkeitsnachweise

3.1.1 Bestimmung der Querschnittsklasse

Nach DIN EN 1993-1-1, Tab. 5.2

$$\varepsilon = 0,81$$

Oberquert: einseitig gestützter Querschnittsteil unter konstanter Druckbeanspruchung

$$\frac{c}{t} = \frac{(296 - 8) / 2 - 7 \cdot \sqrt{2}}{17} = 7,89 < 10 \cdot \varepsilon = 8,10$$

→ Querschnittsklasse 2

Steg: beidseitig gestützter Querschnittsteil unter Biegebeanspruchung

$$\frac{c}{t} = \frac{414 - 7 \cdot \sqrt{2} - 7 \cdot \sqrt{2}}{8} = 49,28 < 72 \cdot \varepsilon = 58,32$$

→ Querschnittsklasse 1

3.1.2 Grundwerkstoff

Beanspruchbarkeit:

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} = \frac{355}{1,0} = 355 \text{ N/mm}^2 ; \tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{355}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 205 \text{ N/mm}^2$$

3.1.2.1 Maximales Feldmoment

- Biegespannung: $\max \sigma_x$ tritt am unteren Rand in Einwirkungskombination 1 auf

$$\sigma_{x,d} = \frac{\max M_{y,d}}{W_{yu}} = \frac{435,0 \cdot 100}{1263} = 34,45 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{34,45}{35,50} = 0,97 < 1$$

- max. Stegnormalspannung aus Radlasteinleitung tritt in Einwirkungskombination 1 auf (Abnutzung der Kranschiene beträgt 25%)

$$b_{eff} = b_f + h_r + t_f \leq b_f = 60 + 37,5 + 17 = 115 \text{ mm} < 296 \text{ mm}$$

$$I_{t,eff} = \frac{b_{eff} \cdot t_f^3}{12} = \frac{115 \cdot 17^3}{12} = 4,7 \text{ cm}^4 \quad \text{Trägheitsmoment des Flanschteils mit der effektiven Breite } b_{eff}$$

$$I_r = \text{entfällt cm}^4 \quad \text{Trägheitsmoment der Schiene um ihre horizontalen Schwerlinie}$$

$$I_f = 108,8 \text{ cm}^4 \quad \text{Trägheitsmoment des zusammenge. Querschnitts Schiene/Flans}$$

$$t_w = 0,8 \text{ cm}$$

$$l_{eff} = 3,25 \cdot \left(\frac{I_f}{t_w} \right)^{1/3} = 16,7 \text{ cm}$$

$$\sigma_{\alpha z,d} = \frac{\max F_{z,d}}{t_w \cdot l_{eff}} = \frac{272,2}{0,8 \cdot 16,7} = 20,36 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{\alpha z,Ed}}{\sigma_{R,d}} = \frac{20,36}{35,50} = 0,57 < 1$$

- max. Vergleichsspannungen am Übergang Flansch zu Steg:

Einwirkungskombination 1

$$\sigma_{\alpha z,d} = 20,36 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\text{oxz,d}} = 0,2 \cdot \sigma_{\text{oxz,Ed}} = 4,07 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{\text{OG}} = \text{Querschnittsfläche des Obergurtes } A_{\text{OG}} + 1/5 \text{ Steg} = 56,9 \text{ cm}^2$$

Laststellung maximales Moment:

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{yo}} + \frac{N_{H,OG,d}}{A_{\text{OG}}} + \frac{N_{L,d}}{A} = \frac{435,0 \cdot 100}{2098} + \frac{52,7}{56,9} + \frac{33,8}{106,1} = 21,98 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{\text{zzug M,d}} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s} = \frac{138,9 \cdot 800,5}{35159,9 \cdot 0,8} = 3,95 \text{ kN/cm}^2$$

Laststellung Auflagernähe (maximale Querkraft):

$$\sigma_{x,d} \cong 0,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{z,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s} = \frac{377,9 \cdot 800,5}{35159,9 \cdot 0,8} = 10,75 \text{ kN/cm}^2$$

→ Nachweis:

Laststellung maximales Moment:

$$\left(\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{oxz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 - \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \cdot \frac{\sigma_{oxz,d}}{\sigma_{R,d}} + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{oxz,d} + \tau_{xz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{21,98}{35,5} \right)^2 + \left(\frac{20,36}{35,5} \right)^2 - \frac{21,98}{35,5} \cdot \frac{20,36}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{4,07 + 3,95}{35,5} \right)^2 = 0,51 < 1$$

Laststellung Auflagernähe:

$$\left(\frac{\sigma_{oxz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{oxz,d} + \tau_{xz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{20,36}{35,5} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{4,07 + 10,75}{35,5} \right)^2 = 0,85 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\sigma_{\text{oxz,d}} = \frac{\max F_{z,d}}{t_w \cdot l_{\text{eff}}} = \frac{243,0}{0,8 \cdot 16,7} = 18,18 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\text{oxz,d}} = 0,2 \cdot \sigma_{\text{oxz,Ed}} = 3,64 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{\text{OG}} = \text{Querschnittsfläche des Obergurtes } A_{\text{OG}} + 1/5 \text{ Steg} = 56,9 \text{ cm}^2$$

Laststellung maximales Moment:

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{yo}} + \frac{N_{H,OG,d}}{A_{\text{OG}}} = \frac{382,7 \cdot 100}{2098} + \frac{101,3}{56,9} = 20,02 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{\text{zzug M,d}} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s} = \frac{121,5 \cdot 800,5}{35159,9 \cdot 0,8} = 3,46 \text{ kN/cm}^2$$

Laststellung Auflagernähe (maximale Querkraft):

$$\sigma_{x,d} \cong 0,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{z,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot s} = \frac{336,2 \cdot 800,5}{35159,9 \cdot 0,8} = 9,57 \text{ kN/cm}^2$$

→ Nachweis:

Laststellung maximales Moment:

$$\left(\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{oxz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 - \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \cdot \frac{\sigma_{oxz,d}}{\sigma_{R,d}} + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{oxz,d} + \tau_{xz,d}}{\sigma_{R,d}} \right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{20,02}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{18,18}{35,5}\right)^2 - \frac{20,02}{35,5} \cdot \frac{18,18}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{3,64 + 3,46}{35,5}\right)^2 = 0,41 < 1$$

Laststellung Auflagnähe:

$$\left(\frac{\sigma_{Oz,d}}{\sigma_{R,d}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Oxz,d} + \tau_{xzd}}{\sigma_{R,d}}\right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{18,18}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{3,64 + 9,57}{35,5}\right)^2 = 0,68 < 1$$

3.1.2.2 Maximale Eckspannung im Obergurt

Einwirkungskombination 1

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{yo}} + \frac{M_{z,d}}{I_{z,OG}} \cdot y + \frac{N_{H,OG,d}}{A_{OG}} + \frac{N_{L,d}}{A}$$

$$\sigma_{x,d} = \frac{435,0 \cdot 100}{2098} + \frac{17,6 \cdot 100}{3674,0} \cdot 15 + \frac{52,7}{56,9} + \frac{33,8}{106,1} = 29,05 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{29,05}{35,50} = 0,82 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{yo}} + \frac{M_{z,d}}{I_{z,OG}} \cdot y + \frac{N_{H,OG,d}}{A_{OG}}$$

$$\sigma_{x,d} = \frac{382,7 \cdot 100}{2098} + \frac{33,8 \cdot 100}{3674,0} \cdot 15 + \frac{101,3}{56,9} = 33,62 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{33,62}{35,50} = 0,95 < 1$$

3.1.2.3 Maximale Querkraft

- max. Steg Schubspannung tritt in EK1 auf:

$$\tau_d = \frac{\max V_{z,d} \cdot S_y}{I_y \cdot s} = \frac{377,9 \cdot 891,2}{35159,9 \cdot 0,8} = 11,97 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\tau_d}{\tau_{R,d}} = \frac{11,97}{20,50} = 0,58 < 1$$

3.1.3 Schweißnähte

Obere Halsnaht

Richtungsbezogenes Verfahren

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\max F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_o \cdot l_{eff}} = \frac{272,2}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 16,7} = 8,23 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{\max V_{z,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y \cdot 2 \cdot a_o} = \frac{377,9 \cdot 800,5}{35159,9 \cdot 2 \cdot 0,7} = 6,14 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{v,w,d} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\parallel}^2} = 19,59 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{w,R,d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{49}{0,9 \cdot 1,25} = 43,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{19,59}{43,56} = 0,45 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 8,2 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Untere Halsnaht

$$\tau_{\perp} = \frac{\max V_{z,d} \cdot S_{y,UG}}{I_y \cdot 2 \cdot a_u} = \frac{377,9 \cdot 613,6}{35159,9 \cdot 2 \cdot 0,7} = 4,71 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{v,w,d} = \sqrt{3 \cdot \tau_{\perp}^2} = 8,16 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{8,16}{43,56} = 0,19 < 1$$

Schienenschweißnaht

- Lastausbreitungslänge an der Schienenschweißnaht

$$l = l_{\text{eff}} - 2 \cdot t_f = 16,7 - 2 \cdot 1,7 = 13,3 \text{ cm}$$

$$l_w = 9,0 \text{ cm}$$

- Durchlaufende Schweißnaht

Einwirkungskombination 1

$$\begin{aligned} \max \tau_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} + \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ &= \frac{272,2}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 13,3} + \frac{35,1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 13,3} = 11,66 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{zu } \sigma_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} - \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ &= \frac{272,2}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 13,3} - \frac{35,1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 13,3} = 9,00 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\tau_{\parallel} = 0 \quad \text{da nicht mittragende Schiene}$$

$$\sigma_{v,w,d} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\parallel}^2} = 22,11 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{w,R,d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{49}{0,9 \cdot 1,25} = 43,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{22,11}{43,56} = 0,51 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 11,7 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Einwirkungskombination 5

$$\begin{aligned} \max \tau_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} + \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ &= \frac{243,0}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 13,3} + \frac{67,5}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 13,3} = 11,78 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{zu } \sigma_{\perp} &= \frac{F_{z,d}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} - \frac{H_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w \cdot l} \\ &= \frac{243,0}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 13,3} - \frac{67,5}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,7 \cdot 13,3} = 6,66 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\tau_{\parallel} = 0 \quad \text{da nicht mittragende Schiene}$$

$$\sigma_{v,w,d} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\parallel}^2} = 21,47 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{w,R,d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{49}{0,9 \cdot 1,25} = 43,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{21,47}{43,56} = 0,49 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 11,8 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

3.2 Stabilitätsnachweise

3.2.1 Biegedrillknicken - Knicken des Obergurtes

$$A_{DG} = \text{Querschnittsfläche des Obergurtes } A_{OG} + 1/5 \text{ Steg} = 56,9 \text{ cm}^2$$

$$i_{z,OG} = \sqrt{\frac{I_{z,OG}}{A_{DG}}} = \sqrt{\frac{3674,0}{56,9}} = 8,0$$

$$W_{OG,z} = \frac{I_{z,OG}}{b/2} = \frac{3674,0}{14,8} = 248,2 \text{ cm}^3$$

- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstab

$$N_{OG,d} = \frac{M_{y,d}}{h_{steg} + 0,5 \cdot (t_{f,u} + t_{f,o})} + N_{H,OG,d} + N_{L,d}$$

Einwirkungskombination 1

$$N_{OG,d} = \frac{435,0}{41,4 + 0,5 \cdot (1,5 + 1,7)} \cdot \frac{100}{1} + 52,7 + 33,8 = 1098,0 \text{ kN}$$

$$M_{z,d} = 17,6 \text{ kNm}$$

Einwirkungskombination 5

$$N_{OG,d} = \frac{382,7}{41,4 + 0,5 \cdot (1,5 + 1,7)} \cdot \frac{100}{1} + 101,3 = 991,3 \text{ kN}$$

$$M_{z,d} = 33,8 \text{ kNm}$$

- Knicklänge des Druckstab $L_{cr} = 1,0 \cdot 2,0 \text{ m} = 2,0 \text{ m}$

$$\lambda_{y1} = 76,4 \quad (\text{Bezugsschlankheitsgrad})$$

$$\lambda_{z} = \frac{L_{cr}}{i_{z,OG} \cdot \lambda_{y1}} = \frac{200,0}{8,0 \cdot 76,4} = 0,33$$

- Knicklinie nach [3-1-1/Tab.6.2]

Schweißprofil; $t_f < 40 \text{ mm}$; ausweichen senkrecht zur Achse z \rightarrow Knicklinie c

- Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_{z} - 0,2)] + \lambda_{z}^2 \\ &= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,33 - 0,2)] + 0,33^2 = 0,59 \end{aligned}$$

$$X_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{z}^2}} = \frac{1}{0,59 + \sqrt{0,59^2 - 0,33^2}} = 0,93 < 1,00$$

- Für die Querschnittsklassen 1 und 2 gilt nach [3-1-1/Anhang]

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot [1 + (2 \cdot \lambda_{z} - 0,6) \cdot \frac{N_{OG,d}}{X_z \cdot A_{DG} \cdot f_y} \cdot \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M2}}]$$

$$\text{jedoch: } k_{zz} \leq C_{mz} \cdot [1 + 1,4 \cdot \frac{N_{OG,d}}{X_z \cdot A_{DG} \cdot f_y} \cdot \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M2}}]$$

Einwirkungskombination 1

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left[1 + (2 \cdot 0,33 - 0,6) \cdot \frac{1098,0}{0,93 \cdot 56,9 \cdot 35,5} \cdot 1,1 \right] = 0,93$$

$$< 0,9 \cdot \left[1 + 1,4 \cdot \frac{1098,0}{0,93 \cdot 56,9 \cdot 35,5} \cdot 1,1 \right] = 1,71$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Nachweis: } \frac{N_{0g,d} \cdot \gamma_{M1}}{X_z \cdot A_{0g} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{W_{0g,z} \cdot f_y} &\leq 1 \\ &= \frac{1098,0}{0,93 \cdot 56,9 \cdot 35,5} + \frac{0,93 \cdot 1755,0 \cdot 1,1}{248,2 \cdot 35,5} = 0,84 < 1 \end{aligned}$$

Einwirkungskombination 5

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left[1 + (2 \cdot 0,33 - 0,6) \cdot \frac{991,3}{0,93 \cdot 56,9 \cdot 35,5} \cdot 1,1 \right] = 0,93$$

$$< 0,9 \cdot \left[1 + 1,4 \cdot \frac{991,3}{0,93 \cdot 56,9 \cdot 35,5} \cdot 1,1 \right] = 1,63$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Nachweis: } \frac{N_{0g,d} \cdot \gamma_{M1}}{X_z \cdot A_{0g} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{W_{0g,z} \cdot f_y} &\leq 1 \\ &= \frac{991,3}{0,93 \cdot 56,9 \cdot 35,5} + \frac{0,93 \cdot 3375,0 \cdot 1,1}{248,2 \cdot 35,5} = 0,97 < 1 \end{aligned}$$

3.2.2 Beulnachweise**3.2.2.1 Plattenbeulen bei Längsspannungen**

$$\eta_1 = \frac{N_{H,0g,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot A_{0g}} + \frac{N_{L,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot A} + \frac{M_{y,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot W_{yo}}$$

Einwirkungskombination 1

$$\eta_1 = \frac{52,7 \cdot 1,1}{35,5 \cdot 56,9} + \frac{33,8 \cdot 1,1}{35,5 \cdot 106,1} + \frac{435,0 \cdot 100 \cdot 1,1}{35,5 \cdot 2098,1} = 0,68 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\eta_1 = \frac{101,3 \cdot 1,1}{35,5 \cdot 56,9} + \frac{382,7 \cdot 100 \cdot 1,1}{35,5 \cdot 2098,1} = 0,62 < 1$$

3.2.2.2 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast (EK1)

- Maximale vertikale Radlast $\max F_{z,d} = 272,2 \text{ kN}$
- Länge der starren Lasteinleitung $s_s = l_{st} - 2 \cdot t_f = 16,7 - 2 \cdot 1,7 = 13,3 \text{ cm}$
- Beulfeldmaß
Länge $a = 600,0 \text{ cm}$
Höhe $h_w = 41,4 \text{ cm}$
Beulfeldstärke $t_w = 0,8 \text{ cm}$
- Beulwert (Typ a) $k_f = 6 + 2 \cdot (h_w / a)^2$
 $= 6 + 2 \cdot (41,4 / 600)^2 = 6,01$
- Kritische Beullast $F_{cr} = 0,9 \cdot k_f \cdot E \cdot t_w^3 / h_w$
 $= 0,9 \cdot 6,01 \cdot 21000 \cdot 0,8^3 / 41,4$
 $= 1405 \text{ kN}$

- Hilfswerte für die Berechnung der Quetschgrenze

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w} = \frac{15,1}{0,8} = 18,88 \quad b_f = \text{Flanschbreite des kleineren Flansches}$$

$$m_2 = 0,02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 0,02 \cdot \left(\frac{41,4}{1,7} \right)^2 = 11,86 \quad (\text{gilt für } \lambda_{z2} > 0,5)$$

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) = 13,3 + 2 \cdot 1,7 \cdot \left(1 + \sqrt{18,9 + 11,9} \right) = 35,6 \text{ cm} < 600,0 \text{ cm}$$

$$\bullet \text{ Quetschgrenze } F_y = f_y \cdot t_w \cdot l_y = 35,5 \cdot 0,8 \cdot 35,6 = 1009,9 \text{ kN}$$

• Schlankheitsparameter

$$\lambda_{z2} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{1010}{1405}} = 0,85 > 0,5 \rightarrow m_2 = 11,86$$

$$l_y = 13,3 + 2 \cdot 1,7 \cdot \left(1 + \sqrt{18,9 + 11,9} \right) = 35,6 \text{ cm} < 600,0 \text{ cm}$$

$$\bullet \text{ Quetschgrenze } F_y = f_y \cdot t_w \cdot l_y = 35,5 \cdot 0,8 \cdot 35,6 = 1009,9 \text{ kN}$$

• Schlankheitsparameter

$$\lambda_{z2} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{1010}{1405}} = 0,85$$

• Abminderungsfaktor

$$X_F = \frac{0,5}{\lambda_{z2}} = \frac{0,5}{0,85} = 0,59 < 1 \quad \text{maximal zulässiger Wert } X_F = 1,0$$

$$\bullet \text{ wirksame Länge } L_{eff} = X_F \cdot l_y = 0,59 \cdot 35,6 = 21,0 \text{ cm}$$

• Beulnachweis für Querspannungen

$$\eta^2 = \frac{\max F_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w} = \frac{272,2}{35,5 \cdot 21,0 \cdot 0,8} = 0,50 < 1$$

• Interaktion von Biege- und Querspannungen

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 = 0,50 + 0,8 \cdot 0,68 = 1,05 < 1,4$$

3.2.2.3 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

Um das Einknicken des Druckflansches in den Steg zu vermeiden, sollte das Verhältnis h_w/t_w des Stegs folgendes Kriterium erfüllen. [3-1-5/8]:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{h_w \cdot t_w}{b_f \cdot t_f}} \quad k = 0,55 \quad (\text{wenn nur die elastische Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt wird})$$

$$\frac{41,4}{0,8} \leq 0,55 \cdot \frac{21000}{35,5} \cdot \sqrt{\frac{41,4 \cdot 0,8}{29,6 \cdot 1,7}}$$

$$51,8 < 264,0$$

3.3 Ermüdungsnachweise

Beanspruchungsklasse **S1** → Schadensäquivalenter Beiwert λ

Längsspannung $\lambda = 0,250$

Schubspannung $\lambda = 0,436$

Inspektionsintervalle **3** → Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mf} = 1,15$

3.3.1 Nachweis Oberkante Flansch, Schienenschweißnaht (Nachweisstelle a)

3.3.1.1 Normalspannung an der Flanschoberkante

$$\bullet \text{ Schnittgrößen: } \max M_{y,d} = 300,6 \text{ kNm} \quad \min M_{y,d} = 13,5 \text{ kNm}$$

- Spannungen

$$\sigma_{x,max} = \frac{\max M_y}{W_{yo}} = \frac{300,6 \cdot 100}{2098,1} = 14,33 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,min} = \frac{\min M_y}{W_{yo}} = \frac{13,5 \cdot 100}{2098,1} = 0,64 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |14,33 - 0,64| = 13,68 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,250$

$$\Delta \sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_x = 0,250 \cdot 13,68 = 3,42 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 100 Bezugswert: $\Delta \sigma_c = 10,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,42}{10,00 \cdot 1,15} = 0,3 < 1$$

3.3.1.2 Lasteinleitungsspannungen Schienenschweißnaht

- Lastausbreitung an der Flanschoberkante $s_s = 13,3 \text{ cm}$ (wie Beulnachweis)

- exzentrisch vertikale Radlast B

$$B = F_{zd} \cdot \frac{0,75 \cdot b_{tr} + a_w / 2}{b_{tr} + a_w} = 191,4 \cdot \frac{0,75 \cdot 60 + 7 / 2}{60 + 7} = 138,6 \text{ kN}$$

- Spannungen an der Schweißnahtunterkante

$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{s_s \cdot 2 \cdot a_w} = \frac{191,4}{13,3 \cdot 2 \cdot 0,7} = 10,27 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = 0,2 \cdot \sigma_{\perp} = 0,2 \cdot 10,27 = 2,05 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\perp} = 0$$

$$\text{Spannungsspiel } \Delta \sigma_{wf} = 10,27 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Spannungsspiel } \Delta \tau_{\parallel} = 2 \cdot \tau_{\parallel} = 4,11 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1** → **S2**

- Nachweis von $\Delta \sigma_{wf} = 10,27 \text{ kN/cm}^2$

$$\text{Schadensäquivalenter Beiwert } \lambda = 0,315$$

$$\Delta \sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_{wf} = 0,315 \cdot 10,27 = 3,24 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 36 Bezugswert: $\Delta \sigma_c = 3,6 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,24}{3,60 \cdot 1,15} = 0,78 < 1$$

- Nachweis von $\Delta \tau_{\parallel} = 2 \cdot \tau_{\parallel} = 4,11 \text{ kN/cm}^2$

$$\text{Schadensäquivalenter Beiwert } \lambda = 0,500$$

$$\Delta \tau_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \tau_{\parallel} = 0,500 \cdot 4,11 = 2,05 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta \tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,05}{8,00 \cdot 1,15} = 0,22 < 1$$

3.3.2 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle b)

3.3.2.1 Normalspannung σ_x aus globaler Tragwirkung infolge maximalen Feldmoment

- Widerstandsmoment Stegansatz

$$W_y = \frac{I_y}{z_{sy} - t_f - a_o \cdot \sqrt{2}} = \frac{35159,9}{16,8 - 1,7 - 0,7 \cdot \sqrt{2}} = 2499,3 \text{ cm}^3$$

- Spannungen

$$\sigma_{x,max} = \frac{\max M_y}{W_y} = \frac{300,6 \cdot 100}{2499,3} = 12,03 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,min} = \frac{\min M_y}{W_y} = \frac{13,5 \cdot 100}{2499,3} = 0,54 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |12,03 - 0,54| = 11,49 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,250$

$$\Delta \sigma_{x,E,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_x = 0,250 \cdot 11,49 = 2,87 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 112 Bezugswert: $\Delta \sigma_{xc} = 11,2 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{x,E,2}}{\Delta \sigma_{xc} / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 2,87}{11,20 \cdot 1,15} = 0,22 < 1$$

3.3.2.2 Radlasteinleitungsspannung σ_{α}

- Stegpressung
- vertikale Druckspannungen

$$\sigma_{\alpha,d} = \frac{F_{z,d}}{I_{eff} \cdot t_w} = \frac{191,4}{16,7 \cdot 0,8} = 14,32 \text{ kN/cm}^2$$

- Stegbiegung

- Schienenkopfbreite $b = 60,0 \text{ mm}$

- Torsionsmoment aus exzentrischem Radlastangriff

$$T_d = F_{z,d} \cdot b / 4 = 191,4 \cdot 6,0 / 4 = 287,1 \text{ kNcm}$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot h_w}{a} = \frac{\pi \cdot 41,4}{600} = 0,217$$

- Torsionsträgheitsmoment des Flansches

$$I_t = \frac{b_f \cdot t_f^3}{3} = \frac{29,6 \cdot 1,7^3}{3} = 48,5 \text{ cm}^4$$

$$\eta = \sqrt{\frac{0,75 \cdot a \cdot t_w^2}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\beta)}{\sinh(2\beta) - 2\beta}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,75 \cdot 600 \cdot 0,8^2}{48,5} \cdot \frac{\sinh^2(0,217)}{\sinh(0,434) - 0,434}} = 4,068$$

$$\sigma_{T,d} = \frac{6}{a \cdot t_w^2} \cdot T_d \cdot \eta \cdot \tanh(\eta)$$

$$= \frac{6}{600 \cdot 0,8^2} \cdot 287,1 \cdot 4,068 \cdot \tanh(4,068) = 18,24 \text{ kN/cm}^2$$

- Stegpressung + Stegbiegung

$$\sigma_{\alpha,d,ges.} = \sigma_{\alpha,d} + \sigma_{T,d} = 14,32 + 0,00 = 14,32 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Stegbiegung entfällt})$$

$$\Delta \sigma_{\alpha} = 14,32 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1 → S2**

Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,315$

$$\Delta\sigma_{zE,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma_{zE,1} = 0,315 \cdot 14,32 = 4,51 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 71 Bezugswert: $\Delta\sigma_{zc} = 7,1 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\sigma_{zE,2}}{\Delta\sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 4,51}{7,10 \cdot 1,15} = 0,55 < 1$$

3.3.2.3 Schubspannungen τ_{xz} aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung im Feld

- Querkräfte

$$\max V = 95,7 \text{ kN} \quad \min V = -95,7 \text{ kN}$$

$$\Delta V = \max V - \min V = 191,4 \text{ kN}$$

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung

- Statisches Moment am Übergang Schweißnaht - Steg

$$S_{yF} = S_y - t_w \cdot \frac{(z_{sy} - t_f - a_w \cdot \sqrt{2})^2}{2} = 812,0 \text{ cm}^3$$

$$\Delta\tau_{xz,c} = \frac{\Delta V \cdot S_{yF}}{I_y \cdot t_w} = \frac{191,4 \cdot 812,0}{35159,9 \cdot 0,8} = 5,53 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen (20% der Radlastpressung)

$$\tau_{\alpha z,d} = 0,2 \cdot \sigma_{\alpha z,d} = 2,86 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta\tau_{xz} = \Delta\tau_{xz,c} + 2 \cdot \tau_{\alpha z,d} = 5,53 + 2 \cdot 2,86 = 11,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1 → S2**

Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,500$

$$\Delta\tau_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\tau_{xz} = 0,500 \cdot 11,25 = 5,63 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 80 Bezugswert: $\Delta\tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 5,63}{8,00 \cdot 1,15} = 0,61 < 1$$

3.3.2.4 Interaktion

$$\left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\sigma_{zE,2}}{\Delta\sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\sigma_{zE,2}}{\Delta\sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mt}} \right)^5 \leq 1$$

$$0,22^3 + 0,55^3 + 0,61^5 = 0,27 < 1$$

3.3.3 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle c)

3.3.3.1 Schubspannungen τ_{xz} aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung

- Querkräfte

$$\max V = 255,2 \text{ kN} \quad \min V = 0,0 \text{ kN}$$

$$\Delta V = \max V - \min V = 255,2 \text{ kN}$$

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung

$$\Delta\tau_{xz,c} = \frac{\Delta V \cdot S_y}{I_y \cdot t_w} = \frac{255,2 \cdot 812,0}{35159,9 \cdot 0,8} = 7,37 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen (20% der Radlastpressung)

$$\tau_{\alpha z,d} = 0,2 \cdot \sigma_{\alpha z,d} = 2,86 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta \tau_{\alpha z} = \Delta \tau_{\alpha z,c} + 2 \cdot \tau_{\alpha z,d} = 7,37 + 2 \cdot 2,86 = 13,09 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert für **S1** $\lambda = 0,436$

$$\Delta \tau_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \tau_{\alpha z} = 0,436 \cdot 13,09 = 5,71 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 80 Bezugswert: $\Delta \tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 5,71}{8,00 \cdot 1,15} = 0,62 < 1$$

3.3.3.2 Radlasteinleitungsspannung $\sigma_{\alpha z}$

(siehe Abschnitt 3.3.2.2)

3.3.3.3 Interaktion

$$\left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{zE,2}}{\Delta \sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} \right)^5 \leq 1$$

$$0,55^3 + 0,62^5 = 0,26 < 1$$

3.3.4 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle b)

3.3.4.1 Radlasteinleitungsspannung $\sigma_{\alpha z}$

- Schweißnahtpressung

$$\sigma_{\alpha z,d,w} = \frac{F_{z,d}}{l_{eff} \cdot 2 \cdot a_o} = \frac{191,4}{16,7 \cdot 2 \cdot 0,7} = 8,18 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannung aus der Stegbiegung in der Schweißnaht $\sigma_{T,d,w}$

$$M_{steg} = \sigma_{T,d} \cdot \frac{t_w^2 \cdot l_{eff}}{6} = 18,24 \cdot \frac{0,8^2 \cdot 16,7}{6} = 32,5 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{T,d,w} = \frac{M_{steg}}{(t_w + a_o) \cdot a_o \cdot l_{eff}} = \frac{32,5}{(0,8 + 0,7) \cdot 0,7 \cdot 16,7} = 1,85 \text{ kN/cm}^2$$

- $\sigma_{\alpha z,d,w} + \sigma_{T,d,w}$

$$\sigma_{\alpha z,d,ges.} = \sigma_{\alpha z,d,w} + \sigma_{T,d,w} = 8,18 + 0,00 = 8,18 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Stegbiegung entfällt})$$

$$\Delta \sigma_{\alpha z} = 8,18 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungskategorie um 1 erhöht! **S1** \rightarrow **S2**

$$\text{Schadensäquivalenter Beiwert } \lambda = 0,315$$

$$\Delta \sigma_{zE,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_{\alpha z} = 0,315 \cdot 8,18 = 2,58 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbkategorie 71 Bezugswert: $\Delta \sigma_{zc} = 7,1 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{zE,2}}{\Delta \sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,58}{7,10 \cdot 1,15} = 0,32 < 1$$

3.3.4.2 Schubspannungen $\tau_{\alpha z}$ aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung

- Querkräfte

$$\max V = 95,7 \text{ kN} \quad \min V = -95,7 \text{ kN}$$

$$\Delta V = \max V - \min V = 191,4 \text{ kN}$$

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung
- Statisches Moment am Übergang Schweißnaht - Flansch

$$S_{y,OG} = S_y - t_w \cdot \frac{(z_{sy} - t_f)^2}{2} = 800,5 \text{ cm}^3$$

$$\Delta T_{xz,c} = \frac{\Delta V}{I_y} \cdot \frac{S_{y,OG}}{t_w} = \frac{191,4}{35159,9} \cdot \frac{800,5}{0,8} = 5,45 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen (20% der Radlastpressung)

$$\tau_{\alpha z,d} = 0,2 \cdot \sigma_{\alpha z,d,w} = 1,64 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta T_{xz} = \Delta T_{xz,c} + 2 \cdot \tau_{\alpha z,d} = 5,45 + 2 \cdot 1,64 = 8,72 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1** → **S2**

$$\text{Schadensäquivalenter Beiwert } \lambda = 0,500$$

$$\Delta T_{E2} = \lambda \cdot \Delta T_{xz} = 0,500 \cdot 8,72 = 4,36 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta T_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta T_{E2}}{\Delta T_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 4,36}{8,00 \cdot 1,15} = 0,47 < 1$$

3.3.4.3 Normalspannung σ_x aus globaler Tragwirkung

- Widerstandsmoment Stegansatz

$$W_y = \frac{I_y}{z_{sy} - t_f} = \frac{35159,9}{16,8 - 1,7} = 2335,0 \text{ cm}^3$$

- Spannungen

$$\sigma_{x,max} = \frac{\max M_y}{W_y} = \frac{300,6 \cdot 100}{2335,0} = 12,87 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,min} = \frac{\min M_y}{W_y} = \frac{13,5 \cdot 100}{2335,0} = 0,58 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}| = |12,87 - 0,58| = 12,30 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,250$

$$\Delta \sigma_{E2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_x = 0,250 \cdot 12,30 = 3,07 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 112 Bezugswert: $\Delta \sigma_{xc} = 11,2 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E2}}{\Delta \sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,07}{11,20 \cdot 1,15} = 0,24 < 1$$

3.3.5 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle c)

3.3.5.1 Schubspannungen τ_{xz} aus globaler Tragwirkung und aus Radlastpressung

- Querkräfte

$$\max V = 255,2 \text{ kN} \quad \min V = 0,0 \text{ kN}$$

$$\Delta V = \max V - \min V = 255,2 \text{ kN}$$

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung

$$\Delta T_{xz,c} = \frac{\Delta V}{I_y} \cdot \frac{S_{y,OG}}{t_w} = \frac{255,2}{35159,9} \cdot \frac{800,5}{0,8} = 7,26 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen (20% der Radlastpressung)

$$\tau_{\alpha z, d} = 0,2 \cdot \sigma_{\alpha z, d} = 1,64 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta \tau_{\alpha z} = \Delta \tau_{\alpha z, c} + 2 \cdot \tau_{\alpha z, d} = 7,26 + 2 \cdot 1,64 = 10,54 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert für **S1** $\lambda = 0,436$

$$\Delta \tau_{E, 2} = \lambda \cdot \Delta \tau_{\alpha z} = 0,436 \cdot 10,54 = 4,59 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta \tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E, 2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 4,59}{8,00 \cdot 1,15} = 0,50 < 1$$

3.3.5.2 Radasteinleitungsspannung $\sigma_{\alpha z}$

(siehe Abschnitt 3.3.4.1)

3.3.6 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle d)

3.3.6.1 Schubspannungen $\tau_{\alpha z}$ aus globaler Tragwirkung

- Schubspannung aus globaler Tragwirkung
- Statisches Moment am Übergang Schweisnaht - Flansch

$$S_{y,UG} = S_y - t_w \cdot \frac{(h - z_{sy} - t_f)^2}{2} = 613,6 \text{ cm}^3$$

$$\Delta \tau_{\alpha z, c} = \frac{\Delta V}{I_y} \cdot \frac{S_{y,UG}}{t_w} = \frac{191,4}{35159,9} \cdot \frac{613,6}{0,8} = 4,18 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta \tau_{\alpha z} = \Delta \tau_{\alpha z, c} = 4,18 \text{ kN/cm}^2$$

- Da jede Kranüberfahrt zu zwei Spannungsspielen führt, wird die Beanspruchungsklasse um 1 erhöht! **S1** \rightarrow **S2**

Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,500$

$$\Delta \tau_{E, 2} = \lambda \cdot \Delta \tau_{\alpha z} = 0,500 \cdot 4,18 = 2,09 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta \tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E, 2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,09}{8,00 \cdot 1,15} = 0,23 < 1$$

3.3.6.2 Normalspannung σ_x aus globaler Tragwirkung

- Widerstandsmoment Stegansatz

$$W_y = \frac{I_y}{h - z_{sy} - t_f} = \frac{35159,9}{44,6 - 16,8 - 1,5} = 1334,8 \text{ cm}^3$$

- Spannungen

$$\sigma_{x, \max} = \frac{\max M_y}{W_y} = \frac{300,6 \cdot 100}{1334,8} = 22,52 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x, \min} = \frac{\min M_y}{W_y} = \frac{13,5 \cdot 100}{1334,8} = 1,01 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Delta \sigma_x = |\sigma_{x, \max} - \sigma_{x, \min}| = |22,52 - 1,01| = 21,51 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert $\lambda = 0,250$

$$\Delta \sigma_{E, 2} = \lambda \cdot \Delta \sigma_x = 0,250 \cdot 21,51 = 5,38 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 112 Bezugswert: $\Delta\sigma_{xc} = 11,2 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\sigma_{x\pm 2}}{\Delta\sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 5,38}{11,20 \cdot 1,15} = 0,42 < 1$$

3.3.7 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle e)

- Schubspannungen τ_{xz} aus globaler Tragwirkung

$$\Delta\tau_{xz,c} = \frac{\Delta V}{I_y} \cdot \frac{S_{y,UG}}{t_w} = \frac{255,2}{35159,9} \cdot \frac{613,6}{0,8} = 5,57 \text{ kN/cm}^2$$

- Spannungsschwingbreite

$$\Delta\tau_{xz} = \Delta\tau_{xz,c} = 5,57 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensäquivalenter Beiwert für S1 $\lambda = 0,436$

$$\Delta\tau_{\pm 2} = \lambda \cdot \Delta\tau_{xz} = 0,436 \cdot 5,57 = 2,43 \text{ kN/cm}^2$$

- Kerbklasse 80 Bezugswert: $\Delta\tau_c = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta\tau_{\pm 2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,43}{8,00 \cdot 1,15} = 0,26 < 1$$

3.4 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

3.4.1 Vertikale Durchbiegung (vereinfacht)

- Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Q,ser} = 1,0$

- Radlast $F = 180,0 \text{ kN}$

- $a = 4,0 > 0,65 \cdot l = 3,9 \rightarrow \delta_{z,2}$ ist maßgebend

- Durchbiegung aus Radlast

$$\begin{aligned} \delta_{z,1} &= \frac{F \cdot (l - a) \cdot (3 \cdot l^2 - (l - a)^2)}{48 \cdot E \cdot I_y} \\ &= \frac{180,0 \cdot (600 - 400) \cdot (3 \cdot 600^2 - (600 - 400)^2)}{48 \cdot 21000 \cdot 35159,9} = 1,056 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\delta_{z,2} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_y} = \frac{180,0 \cdot 600^3}{48 \cdot 21000 \cdot 35159,9} = 1,097 \text{ cm}$$

- Durchbiegung aus Eigengewicht

$$\delta_{z,g} = 0,013 \cdot \frac{g \cdot l^4}{E \cdot I_y} = 0,013 \cdot \frac{0,030 \cdot 600^4}{21000 \cdot 35159,9} = 0,068 \text{ cm}$$

$$\delta_{z,ges.} = 1,097 + 0,068 = 1,165 \text{ cm}$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \delta_{z,ges.} = 1,165 \text{ cm} < l/500 = 1,200 \text{ cm}$$

3.4.2 Stegblechatmen und Untergurtschwingungen

- Stegblechatmen

$$b_w = h_{steg} - \sqrt{2} a_o - \sqrt{2} a_u = 394,2 \text{ mm} \quad (= \text{kleinere Seitenlänge des Stegblechs})$$

$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{b_w}{t_w} = \frac{394,2}{8,0} = 49,3 < 120$$

- Untergurtschwingungen

$$i_{z,UG} = \sqrt{\frac{I_{z,UG}}{A_{UG}}} = \sqrt{\frac{430,4}{15,1 \cdot 1,5}} = 4,4 \text{ cm}$$

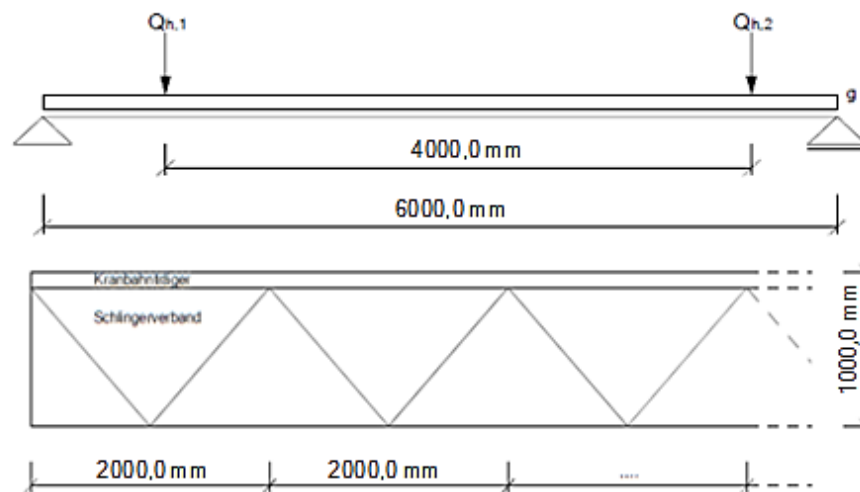
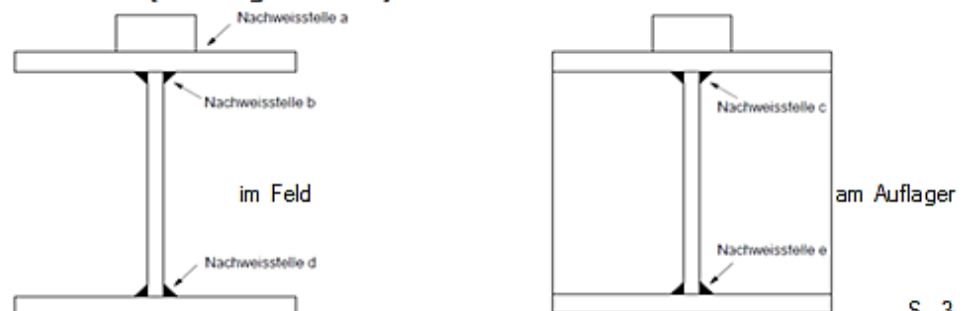
$$\rightarrow \text{Nachweis: } \frac{l}{i_{z,UG}} = \frac{600}{4,4} = 138 < 250$$

Anlage 3: Zusammenfassung der Variante 1

Querschnittswerte:

$A =$	$92,2 \text{ cm}^2$
$I_y =$	$38918,4 \text{ cm}^4$
$W_{y0} =$	$1985,8 \text{ cm}^3$
$W_{yU} =$	$1259,4 \text{ cm}^3$
$I_{z,OG} =$	$2406,1 \text{ cm}^4$
$I_{z,UG} =$	$519,1 \text{ cm}^4$
$S_y =$	$872,3 \text{ cm}^3$
$S_{y,OG} =$	$757,7 \text{ cm}^3$
$S_{y,UG} =$	$559,4 \text{ cm}^3$

Querschnittsklasse: 2

Statisches System:**Nachweisstellen (Ermüdungsnachweise):**

Zusammenfassung**1. Belastung****2. Schnittgrößen****3. Nachweise****3.1 Tragfähigkeitsnachweise****3.1.2 Grundwerkstoff****3.1.2.1 Maximales Feldmoment**

- Biegespannung $\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{34,60}{35,50} = 0,97 < 1$
- max. Stegnormalspannung aus Radlasteinleitung $\frac{\sigma_{\alpha,Ed}}{\sigma_{R,d}} = \frac{23,19}{35,50} = 0,65 < 1$
- max. Vergleichsspannungen am Übergang Flansch zu Steg

Einwirkungskombination 1

Laststellung maximales Moment

$$\left(\frac{23,43}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{23,19}{35,5}\right)^2 - \frac{23,43}{35,5} \cdot \frac{23,19}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{4,64 + 3,87}{35,5}\right)^2 = 0,60 < 1$$

Laststellung Aufgarnhöhe (maximale Querkraft):

$$\left(\frac{23,19}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{4,64 + 10,52}{35,5}\right)^2 = 0,97 < 1$$

Einwirkungskombination 5

Laststellung maximales Moment

$$\left(\frac{20,35}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{20,70}{35,5}\right)^2 - \frac{20,35}{35,5} \cdot \frac{20,70}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{4,14 + 3,38}{35,5}\right)^2 = 0,47 < 1$$

Laststellung Aufgarnhöhe (maximale Querkraft):

$$\left(\frac{20,70}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{4,14 + 9,35}{35,5}\right)^2 = 0,77 < 1$$

3.1.2.2 Maximale Eckspannung im Obergut**Einwirkungskombination 1**

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{33,21}{35,50} = 0,94 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{29,75}{35,50} = 0,84 < 1$$

3.1.2.3 Maximale Querkraft

$$\frac{\tau_d}{\tau_{R,d}} = \frac{12,11}{20,50} = 0,59 < 1$$

3.1.3 Schweißnähte**Obere Halsnaht**

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{18,75}{43,56} = 0,43 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 8,2 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Untere Halsnaht

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{6,72}{43,56} = 0,15 < 1$$

Schienenschweißnaht**Einwirkungskombination 1**

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{21,37}{43,56} = 0,49 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 11,3 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{19,19}{43,56} = 0,44 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 10,2 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

3.2 Stabilitätsnachweise

3.2.1 Biegedrillknicken - Knicken des Obergurtes

Einwirkungskombination 1

$$\frac{971,3}{0,91 \cdot 46,9 \cdot 35,5} + \frac{0,99 \cdot 1755,0}{179,6 \cdot 35,5} = 1,00 > 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{827,7}{0,91 \cdot 46,9 \cdot 35,5} + \frac{0,98 \cdot 1687,5}{179,6 \cdot 35,5} = 0,88 < 1$$

3.2.2 Beulnachweise

3.2.2.1 Plattenbeulen bei Längsspannungen

Einwirkungskombination 1

$$\eta_1 = \frac{52,7}{35,5 \cdot 46,9} + \frac{33,8}{35,5 \cdot 92,2} + \frac{435,8 \cdot 100}{35,5 \cdot 1985,8} = 0,73 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\eta_1 = \frac{50,6}{35,5 \cdot 46,9} + \frac{382,7 \cdot 100}{35,5 \cdot 1985,8} = 0,63 < 1$$

3.2.2.2 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast (EK1)

$$\eta_2 = \frac{\max F_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w} = \frac{272,2}{35,5 \cdot 17,4 \cdot 0,7} = 0,69 < 1$$

3.2.2.3 Interaktion

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 = 0,69 + 0,8 \cdot 0,73 = 1,27 < 1,4$$

3.2.2.4 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{h_w \cdot t_w}{b_f \cdot t_f}} ; \quad = 68,6 < 297,4$$

3.3 Ermüdungsnachweise

3.3.1 Nachweis Oberkante Flansch, Schienenschweißnaht (Nachweisstelle a)

Oberkante Flansch

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,61}{10,00 \cdot 1,15} = 0,31 < 1$$

Schienenschweißnaht

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,13}{3,60 \cdot 1,15} = 0,76 < 1$$

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 1,99}{8,00 \cdot 1,15} = 0,22 < 1$$

3.3.2 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle b)

3.3.2.1 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{x,E,2}}{\Delta \sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,16}{11,20 \cdot 1,15} = 0,24 < 1$$

3.3.2.2 Radasteinleitungsspannung σ_{∞}

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{z,E,2}}{\Delta \sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 5,14}{7,10 \cdot 1,15} = 0,63 < 1$$

3.3.2.3 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta T_c} \cdot \frac{\Delta T_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{5,97}{1,15} = 0,65 < 1$$

3.3.2.4 Interaktion

$$0,24^3 + 0,63^3 + 0,65^3 = 0,38 < 1$$

3.3.3 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle c)

3.3.3.1 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta T_c} \cdot \frac{\Delta T_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{5,99}{1,15} = 0,65 < 1$$

3.3.3.2 Interaktion

$$0,63^3 + 0,65^3 = 0,37 < 1$$

3.3.4 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle b)

3.3.4.1 Radlasteinleitungsspannung σ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{xz}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{x,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{7,10} \cdot \frac{2,57}{1,15} = 0,31 < 1$$

3.3.4.2 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta T_c} \cdot \frac{\Delta T_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{4,29}{1,15} = 0,47 < 1$$

3.3.4.3 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{xz}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{x,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{11,20} \cdot \frac{3,34}{1,15} = 0,26 < 1$$

3.3.5 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle c)

• Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta T_c} \cdot \frac{\Delta T_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{4,52}{1,15} = 0,49 < 1$$

3.3.6 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle d)

3.3.6.1 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta T_c} \cdot \frac{\Delta T_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{1,97}{1,15} = 0,21 < 1$$

3.3.6.2 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{xz}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{x,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{11,20} \cdot \frac{5,51}{1,15} = 0,43 < 1$$

3.3.7 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle e)

• Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta T_c} \cdot \frac{\Delta T_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{2,28}{1,15} = 0,25 < 1$$

3.4. Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

3.4.1 Vertikale Durchbiegung

$$\delta_{z,ges.} = 1,053 \text{ cm} < 1,500 = 1,200 \text{ cm}$$

3.4.2 Stegblechatmen und Untergurtschwingungen

• Stegblechatmen

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{460,2}{7,0} = 65,7 < 120$$

• Untergurtschwingungen

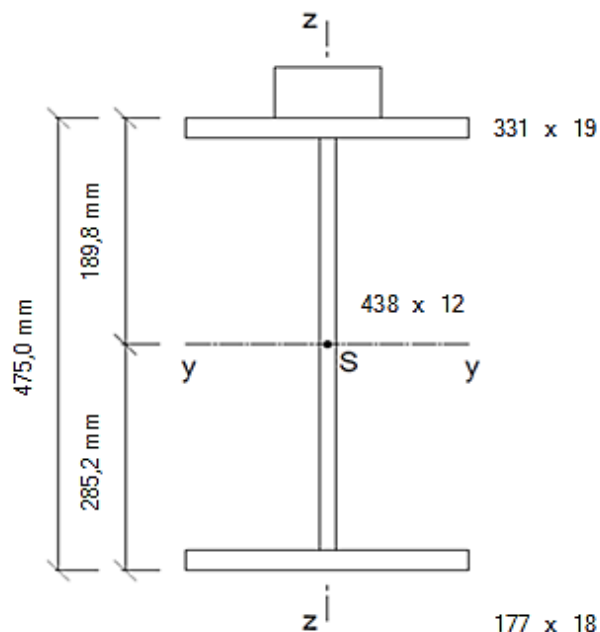
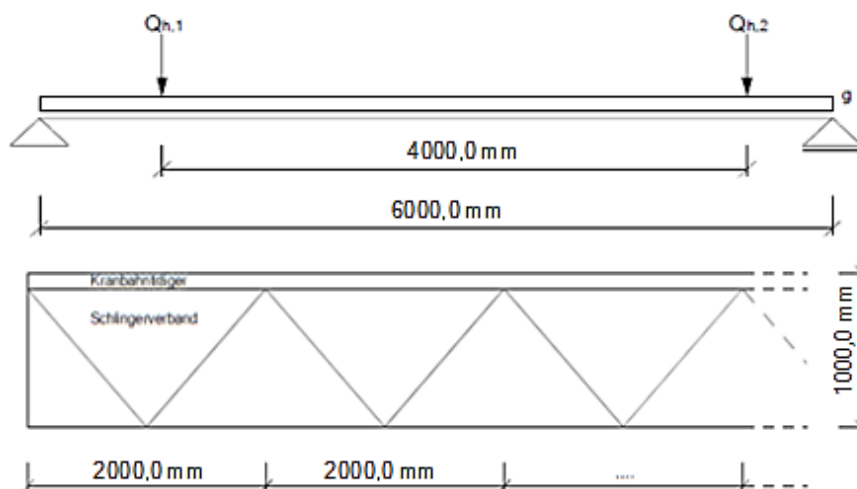
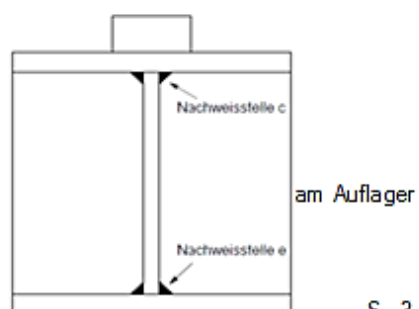
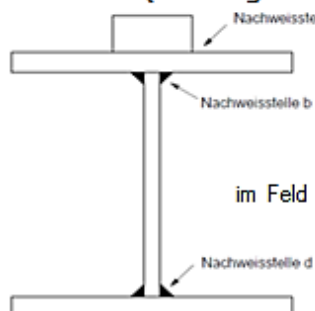
$$\frac{l}{i_{z,UG}} = \frac{600}{5,3} = 113 < 250$$

Anlage 4: Zusammenfassung der Variante 2

Querschnittswerte:

$A =$	$147,3 \text{ cm}^2$
$I_y =$	$54400,6 \text{ cm}^4$
$W_{y0} =$	$2866,8 \text{ cm}^3$
$W_{yu} =$	$1907,2 \text{ cm}^3$
$I_{z,OG} =$	$5741,9 \text{ cm}^4$
$I_{z,UG} =$	$831,8 \text{ cm}^4$
$S_y =$	$1308,6 \text{ cm}^3$
$S_{y,OG} =$	$1133,7 \text{ cm}^3$
$S_{y,UG} =$	$880,1 \text{ cm}^3$

Querschnittsklasse: 2

**Statisches System:****Nachweisstellen (Ermüdungsnachweise):**

Zusammenfassung**1. Belastung****2. Schnittgrößen****3. Nachweise****3.1 Tragfähigkeitsnachweise****3.1.2 Grundwerkstoff****3.1.2.1 Maximales Feldmoment**

- Biegespannung $\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{22,83}{35,50} = 0,64 < 1$
- max. Stegnormalspannung aus Radlasteinleitung $\frac{\sigma_{\alpha,Ed}}{\sigma_{R,d}} = \frac{14,94}{35,50} = 0,42 < 1$
- max. Vergleichsspannungen am Übergang Flansch zu Steg

Einwirkungskombination 1

Laststellung maximales Moment

$$\left(\frac{16,13}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{14,94}{35,5}\right)^2 - \frac{16,13}{35,5} \cdot \frac{14,94}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{2,99 + 2,41}{35,5}\right)^2 = 0,26 < 1$$

Laststellung Aufgarnnähe (maximale Querkraft):

$$\left(\frac{14,94}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{2,99 + 6,56}{35,5}\right)^2 = 0,39 < 1$$

Einwirkungskombination 5

Laststellung maximales Moment

$$\left(\frac{16,11}{35,5}\right)^2 + \left(\frac{13,34}{35,5}\right)^2 - \frac{16,11}{35,5} \cdot \frac{13,34}{35,5} + 3 \cdot \left(\frac{2,67 + 2,11}{35,5}\right)^2 = 0,23 < 1$$

Laststellung Aufgarnnähe (maximale Querkraft):

$$\left(\frac{13,34}{35,5}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{2,67 + 5,84}{35,5}\right)^2 = 0,31 < 1$$

3.1.2.2 Maximale Eckspannung im Obergurt**Einwirkungskombination 1**

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{21,19}{35,50} = 0,60 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{35,56}{35,50} = 1,00 > 1$$

3.1.2.3 Maximale Querkraft

$$\frac{\tau_d}{\tau_{R,d}} = \frac{7,58}{20,50} = 0,37 < 1$$

3.1.3 Schweißnähte**Obere Halsnaht**

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{20,57}{43,56} = 0,47 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 9,1 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Untere Halsnaht

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{7,57}{43,56} = 0,17 < 1$$

Schienenschweißnaht**Einwirkungskombination 1**

$$\frac{\sigma_{v,w,d}}{\sigma_{w,R,d}} = \frac{25,86}{43,56} = 0,59 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 13,6 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{\sigma_{v.w,d}}{\sigma_{w.R,d}} = \frac{29,45}{43,56} = 0,68 < 1$$

$$\sigma_{\perp} = 16,8 \text{ kN/cm}^2 < \frac{0,9 \cdot 49}{1,25} = 35,3 \text{ kN/cm}^2$$

3.2 Stabilitätsnachweise

3.2.1 Biegedrillknicken - Knicken des Obergurtes

Einwirkungskombination 1

$$\frac{1040,2}{0,95 \cdot 73,4 \cdot 35,5} + \frac{0,90 \cdot 1755,0}{346,9 \cdot 35,5} = 0,60 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\frac{1040,9}{0,95 \cdot 73,4 \cdot 35,5} + \frac{0,90 \cdot 6750,0}{346,9 \cdot 35,5} = 1,01 > 1$$

3.2.2 Beulnachweise

3.2.2.1 Plattenbeulen bei Längsspannungen

Einwirkungskombination 1

$$\eta_1 = \frac{52,7}{35,5 \cdot 73,4} + \frac{33,8}{35,5 \cdot 147,3} + \frac{435,4 \cdot 100}{35,5 \cdot 2866,8} = 0,5 < 1$$

Einwirkungskombination 5

$$\eta_1 = \frac{202,5}{35,5 \cdot 73,4} + \frac{382,7 \cdot 100}{35,5 \cdot 2866,8} = 0,5 < 1$$

3.2.2.2 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast (EK1)

$$\eta_2 = \frac{\max F_{z,d} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot l_{eff} \cdot t_w} = \frac{272,2}{35,5 \cdot 30,0 \cdot 1,2} = 0,23 < 1$$

3.2.2.3 Interaktion

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 = 0,23 + 0,8 \cdot 0,50 = 0,63 < 1,4$$

3.2.2.4 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{h_w \cdot t_w}{b_f \cdot t_f}} \quad ; \quad = 36,5 < 297,4$$

3.3 Ermüdungsnachweise

3.3.1 Nachweis Oberkante Flansch, Schienenschweißnaht (Nachweisstelle a)

Oberkante Flansch

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,50}{10,00 \cdot 1,15} = 0,22 < 1$$

Schienenschweißnaht

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,78}{3,60 \cdot 1,15} = 0,91 < 1$$

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,40}{8,00 \cdot 1,15} = 0,26 < 1$$

3.3.2 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle b)

3.3.2.1 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{x,E,2}}{\Delta \sigma_{xc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 2,12}{11,20 \cdot 1,15} = 0,16 < 1$$

3.3.2.2 Radlasteinleitungsspannung σ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft} \cdot \Delta \sigma_{z,E,2}}{\Delta \sigma_{zc} / \gamma_{Mt}} = \frac{1,0 \cdot 3,31}{7,10 \cdot 1,15} = 0,41 < 1$$

3.3.2.3 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{3,79}{1,15} = 0,41 < 1$$

3.3.2.4 Interaktion

$$0,16^3 + 0,41^3 + 0,41^5 = 0,08 < 1$$

3.3.3 Nachweis Stegansatz (Nachweisstelle c)

3.3.3.1 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{3,80}{1,15} = 0,41 < 1$$

3.3.3.2 Interaktion

$$0,41^3 + 0,41^5 = 0,08 < 1$$

3.3.4 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle b)

3.3.4.1 Radlasteinleitungsspannung σ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{xz}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{x,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{7,10} \cdot \frac{2,84}{1,15} = 0,35 < 1$$

3.3.4.2 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{3,46}{1,15} = 0,38 < 1$$

3.3.4.3 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{xc}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{x,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{11,20} \cdot \frac{2,25}{1,15} = 0,17 < 1$$

3.3.5 Nachweis obere Halsnaht (Nachweisstelle c)

• Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{3,50}{1,15} = 0,38 < 1$$

3.3.6 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle d)

3.3.6.1 Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{1,29}{1,15} = 0,14 < 1$$

3.3.6.2 Normalspannung σ_x

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \sigma_{xc}} \cdot \frac{\Delta \sigma_{x,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{11,20} \cdot \frac{3,53}{1,15} = 0,27 < 1$$

3.3.7 Nachweis untere Halsnaht (Nachweisstelle e)

• Schubspannungen τ_{xz}

$$\frac{\gamma_{Ft}}{\Delta \tau_c} \cdot \frac{\Delta \tau_{E,2}}{\gamma_{Mt}} = \frac{1,0}{8,00} \cdot \frac{1,50}{1,15} = 0,16 < 1$$

3.4. Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

3.4.1 Vertikale Durchbiegung

$$\delta_{z,ges.} = 0,753 \text{ cm} < 1,500 = 1,200 \text{ cm}$$

3.4.2 Stegblechatmen und Untergurtschwingungen

• Stegblechatmen

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{418,2}{12,0} = 34,9 < 120$$

• Untergurtschwingungen

$$\frac{l}{i_{z,UG}} = \frac{600}{5,1} = 117 < 250$$

11. Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 16.11.2015

Tom Philipp